

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Пермский федеральный  
исследовательский центр  
Уральского отделения  
Российской академии наук  
(ПФИЦ УрО РАН)  
ул. Ленина, 13а, г. Пермь, 614990  
тел. (342) 212-60-08, факс (342) 212-93-77  
E-mail: psc@permisc.ru, http://www.permisc.ru  
ОКПО 48420579, ОГРН 1025900517378  
ИНН 5902292103, КПП 590201001

03.08.2021

№ 337/2171-401

УТВЕРЖДАЮ  
Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Пермский  
федеральный исследовательский  
центр Уральского отделения  
Российской академии наук  
(ПФИЦ УрО РАН)

Академик РАН, профессор, д.т.н.,  
Барях А.А.

### ОТЗЫВ ведущей организации на диссертацию

Таранова Михаила Александровича

"Волоконно-оптический низкокогерентный рэлеевский рефлектометр для распределенных измерений относительной деформации и температуры"  
по специальности 01.04.03 "Радиофизика" на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация посвящена такой действительно актуальной проблеме, как распределённые измерения при помощи волоконно-оптических датчиков. Современные когерентные рефлектометры имеют довольно дорогую элементную базу, сигнал с них требует сложной, при этом ресурсозатратной цифровой обработки. Даже самые простые датчики на рассеянии Мандельштама-Бриллюэна также довольно сложны в реализации и малодоступны в виду своей дороговизны. Поэтому возможность измерять такие физические величины, как деформации и температуры, путем ввода низкокогерентного излучения в волоконно-оптическую линию при помощи не такого громоздкого и при этом довольно точного инструмента выглядит весьма привлекательной. Особенно интересна перспектива проведения сложных многофакторных экспериментов с комплексным воздействием физических факторов на чувствительный элемент распределённого датчика. Разработка соискателя позволяет разделять температуры и деформации благодаря одновременному использованию рассеяния Рэлея и рассеяния Рамана.

Заявленная соискателем 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. Данная цель, как уже было отмечено, достаточно актуальна. Данный подход является новым и перспективным. Для его реализации соискатель ставит такие 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 Рэля, 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 Рэля. 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.

Методы и результаты решения перечисленных выше задач составляют основное содержание диссертации, которая 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. Автор **выносит на защиту** следующие положения:

- автор утверждает, что 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. Соискатель отмечает, что 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.

- также соискателем установлено, что 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  $2^{1/2}$  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.

- автор отмечает, что 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.

- соискателем выявлено, что 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.

- в диссертации автором показано, что 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.

Таким образом, автором получен ряд важнейших новых результатов, продемонстрирована работоспособность нового метода распределенной сенсорики. **Теоретическая 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 Рэлея. **Практическая значимость** определяется тем, что полученные результаты дают детальную основу для разработки нового класса волоконно-оптических датчиков для распределённых измерений деформации и температуры.

И автореферат, и диссертация, и работа соискателя в целом производят крайне благоприятное впечатление. Повествование логично, осуществляется доступным языком. Текст работы написан грамотно, автореферат и диссертация хорошо оформлены: рисунки и графики выполнены согласно действующих норм и правил, схемы достаточно наглядны. В своих рассуждениях автор опирается на хорошо известные положения математики и физики, на проверенный передовой опыт специальных дисциплин: фотоники, оптики, цифровой обработки сигнала, математической статистики и т.д. В разделах постановки гипотез и их объяснения, в прочих выводах и рассуждениях видимых конфликтов с законами фундаментальных и

технических наук не выявлено. Текст работы находит отражение в представленных в списке литературы публикациях. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Следует, однако, выделить несколько **замечаний**:

1. При выборе метода исследования автор осуществляет сравнение с работой по рефлектометрии частотной области 1998 года. Несмотря на то, что эта работа является в своем роде пионерской, было бы интересно сравнение и с новыми результатами, полученными в этой смежной области.

2. В работе не встречается детального объяснения выбора сравнительно сложного пути разделения температур и деформаций с использованием рассеяния Рамана, ведь "классическое" разделение через два состояния поляризации в анизотропном волокне является достаточно простым и действенным методом.

Указанные замечания имеют незначительную роль, никоим образом не умаляя высокую научно-практическую ценность работы, и несмотря на них, соискатель Таранов Михаил Александрович бесспорно заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 "Радиофизика".

д.ф.-м.н., профессор, заведующий  
лабораторией интеллектуального  
мониторинга ИМСС УрО РАН –  
филиала ПФИЦ УрО РАН

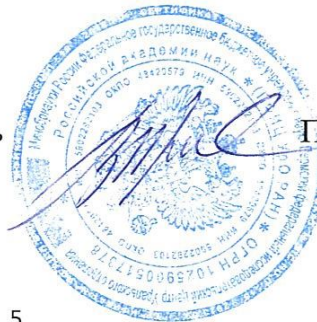
Шардаков И.Н.

к.т.н., с.н.с., заведующий  
лабораторией фотоники  
ПФИЦ УрО РАН

Константинов Ю.А.

Подписи Шардакова И.Н. и Константинова Ю.А. заверяю:

к.т.н., главный ученый секретарь  
ПФИЦ УрО РАН



Приходченко В.П.