

*На правах рукописи*

КРИВОШЕЕВ АНТОН ИВАНОВИЧ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ИЗМЕРЕНИЯ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ В  
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь 2022

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Научный руководитель:** **Первадчук Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Богачков Игорь Викторович**, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», кафедра «Средства связи и информационная безопасность», профессор

**Дашков Михаил Викторович**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», кафедра «Линии связи и измерения в технике связи», исполняющий обязанности заведующего кафедрой

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный университет»

Защита состоится «28» декабря 2022 года в 16:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.14 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>)

Автореферат диссертации разослан «3» ноября 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.14  
доктор технических наук, доцент

В.И. Фрейман

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Специальные волоконные световоды (ВС) находят свое применение во многих оптоэлектронных устройствах. Вследствие высокой сложности процесса производства таких волокон и недостатка средств его технического контроля получение волокон достаточной длины становится нетривиальной задачей. Промышленных автоматизированных методов, пригодных для исследования распределения свойств анизотропии продолжительных ВС (1 км и более) не так много, при этом они не лишены недостатков: сложность разработки, высокая цена, отсутствие в реестре средств измерений и т.д. В связи с этим встает вопрос разработки такой автоматизированной системы измерений (АСИ) параметров специальных ВС, которая позволит повысить качество создаваемых световодов в условиях производств, а также откроет новые возможности для проведения лабораторных исследований.

Одним из примеров современной системы распределенной диагностики состояния волоконной линии можно назвать бриллюэновский рефлектометр/анализатор, работающий благодаря принципу рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (РМБ). Данные о состоянии среды распространения (световедущей структуры ВС) при его использовании скрыты в спектре рассеянного излучения. Поэтому, важной задачей является получение точной информации о положении истинного максимума спектра. При этом искомый спектр может быть значительно искажен шумами системы и различными дефектами. При использовании поляризационной версии прибора становится актуальной задача регистрации двух максимумов – для каждой оси поляризации.

### **Степень разработанности темы.**

Активное применение находят классические и нейросетевые алгоритмы детектирования положения максимума спектра РМБ. Они нашли отражения в работах Chengbin Li, Yongqian Li, Froggatt M.E., Farahani M.A. Существенный вклад в развитие распределенных волоконно-оптических распределенных измерений внесли авторы: Б.Г. Горшков, А.А. Фотиади, И.В. Богачков, А.В. Бурдин, В.В. Бурдин, А.В. Листвин, В.Н. Листвин, М.В. Дашков, В.Ј. Soller, M.A. Soto, J. Jasenek и др. Разработка АСИ для контроля качества ВС методом бриллюэновской рефлектометрии невозможна без создания модели вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) в анизотропных волоконных световодах. Направлению моделирования ВРМБ свои работы посветили следующие авторы: Weiwen Zou, Xin Long, Jianping Chen, Marcelo A. Soto, а также Luc Thévenaz. Вопросы проектирования АСИ используемых в высокотехнологичных производствах посвящены работы таких авторов как: Н.Г. Зайцев, А.В. Дорохов, И.В. Лофицкий, Е.Н. Барышников и др.

Разработка новых методов и алгоритмов контроля оптических волокон с использованием аттестованных систем, а также автоматизация процессов контроля является актуальной задачей.

**Объектом исследования** является технологический процесс контроля качества специальных оптических волокон в производственном цикле методами оптической рефлектометрии.

**Предметом исследования** являются методы контроля оптических волокон и волоконных компонентов, а также свойства и характеристики измеряемых параметров волокон, получаемых при помощи методов оптической рефлектометрии.

### **Цель работы**

Повышение точности измерения характеристик ВС и прогнозирование его эксплуатационных свойств в составе волоконно-оптических датчиков (ВОД) путем внедрения элементов и методов автоматизированного распределенного контроля физических параметров ВС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ современного состояния проблемы разработки волоконных чувствительных элементов для высокоточных систем распределенного мониторинга;

2. Разработать имитационную модель процесса рефлектометрии на основе ВРМБ, учитывающую возможность распространения излучения по двум поляризационным осям ВС, а также позволяющую оценить ошибку определения максимума спектра.

3. Разработать алгоритм автоматизированного измерения параметров оптических волокон, сохраняющих состояние поляризации вводимого излучения, позволяющий модели спрогнозировать точность измерения температур и деформаций;

4. Разработать метод обработки бриллюэновских спектров, обеспечивающий лучшую точность определения положения максимума бриллюэновского спектра, в сравнении с другими методами, в условиях высокой зашумленности спектров;

5. Разработать методику оценки точности методов определения положения максимума бриллюэновского спектра в условиях экстремального зашумления с использованием единого набора данных;

6. Разработать и апробировать в условиях производства АСИ, реализующую использование разработанного метода, а также нейросетевые технологии, включающую в себя оценку состояния поляризации оптического волокна, подключенного к АСИ.

### **Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Разработана имитационная модель процесса рефлектометрии на основе ВРМБ, отличающаяся учетом распространения излучения по двум поляризационным осям ВС, и позволяющая спрогнозировать точность разделения температур и деформаций при работе ВС в составе ВОД.

2. Создан оригинальный метод обработки спектров ВРМБ, отличающийся использованием обратно-корреляционного алгоритма и позволяющий эффективно находить частоту бриллюэновского сдвига в

случае обработки данных с экстремально низким отношением сигнал-шум и дефектами оцифровки в автоматизированной системе измерений.

3. Впервые была предложена уникальная методика оценки точности методов определения положения максимума бриллюэновского спектра (в том числе, разработанного автором метода обратной корреляции), в условиях экстремального зашумления, отличающаяся использованием единого набора данных, что позволило выявить оптимальные условия использования различных подходов детектирования сдвига ВРМБ.

**Основные положения, выносимые на защиту (соответствуют пунктам паспорта специальности):**

1. **Имитационная модель** рефлектометрии ВРМБ в анизотропных ВС, включенная в состав АСИ.

2. **Метод** обработки спектров рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, основанный на обратно-корреляционном алгоритме.

3. **Метод** по оценке точности методов определения максимума бриллюэновского спектра в условиях экстремального зашумления.

4. **Программно-аппаратная АСИ** распределенного детектирования сдвига Бриллюэна с учетом разработанных моделей и методов, а также нейросетевого алгоритма.

**Личный вклад автора:**

Все результаты, составляющие научную новизну настоящей работы, получены автором лично.

**Достоверность полученных результатов:**

Достоверность и обоснованность результатов. Данные, полученные в ходе выполнения исследования, не противоречат результатам, представленными в литературе другими авторами, а также подтверждаются достаточно хорошим совпадением результатов моделирования с экспериментальными данными. Формулирование гипотез и их верификация осуществлялись на основе известных положений общей физики, фотоники, оптоэлектроники, математического анализа и других разделов высшей математики.

**Практическая и теоретическая значимость работы:**

Разработанная программно-аппаратная АСИ для распределенного детектирования сдвига спектра ВРМБ позволила, за счет использования представленных в работе решений, повысить точность детектирования на 10%. Внедренная в АСИ модель и алгоритм измерения параметров специальных ВС позволяет провести оценку качества разрабатываемых датчиков на их основе. Внедрение АСИ в производственный процесс позволяет более точно и оперативно проводить отбор фрагментов ВС для использования в датчиках.

В работе исследованы фундаментальные пределы детектирования различными методами сдвига ВРМБ в экстремально зашумленных спектрах. Сформулирован подход и представлены теоретические основы нового метода детектирования сдвига ВРМБ в экстремально зашумленных спектрах.

### **Методы и методология исследования.**

Для выполнения поставленных в работе задач были использованы теоретические и эмпирические методы исследования. Для обработки результатов использовались типовые математические пакеты и хорошо зарекомендовавшие себя популярные среды программирования. Экспериментальные стенды создавались на основе аттестованных и паспортизованных компонентов, элементов и устройств.

### **Апробация работы:**

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО (г. Пермь, 2017, 2019, 2021 гг.), Всероссийская научно-практическая конференция «Оптическая рефлектометрия» (г. Пермь, 2016, 2018 гг.). Международная научно-практическая конференция «Optical reflectometry, metrology and sensing» (г. Пермь, 2020 г.). Международная научно-практическая конференция «Laser optics» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.)

### **Публикации:**

Основные положения диссертации изложены в 20 работах, в том числе 1 – в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 9 – в изданиях, индексируемых в МБЦ, 10 – в других изданиях.

### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 140 наименований. Объем работы составляет 123 страницы, включая 47 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, обозначены цель и задачи. Раскрыта научная новизна выполненной работы, практическая значимость. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена основам мониторинга оптических волокон методом оптической временной рефлектометрии. Акцент сосредоточен на методе бриллюэновской рефлектометрии, поскольку спектральные компоненты, рассеянного в волокне излучения, возбужденные посредством вынужденного/спонтанного бриллюэновского рассеяния, представляют интерес, с точки зрения волоконно-оптических распределенных датчиков, как зависимые от температуры окружающей среды и механических деформаций, приложенных к оптическому волокну.

Поскольку методом бриллюэновской рефлектометрии потенциально возможно получать очень малые величины изменения температуры и деформации оптического волокна, особое внимание уделено современным подходам к увеличению точности и снижению шумов при получении и обработке бриллюэновских рефлектограмм и спектров.

Рассмотрены основы проектирования автоматизированных систем измерений. Создание автоматизированных систем измерений предусматривает и разработку новых, либо модифицированных методов обработки информации, получаемой с приборов и систем контроля параметров специальных ВС. Интересной представляется задача использования традиционной коммерчески доступной системы распределенного мониторинга для встраивания в АСИ и получения более точных параметров для контроля качества специальных ВС.

**Вторая глава** посвящена моделированию ВРМБ в анизотропных волоконных световодах. Основные свойства бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах определяются следующими выражениями:

$$\left(\frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z}\right) E_p = -\frac{\alpha}{2} E_p + ik_1 \rho E_s \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z}\right) E_s = -\frac{\alpha}{2} E_s + ik_1 \rho E_p \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\Gamma_B}{2} + 2\pi i v_B\right) \rho = ik_2 E_p E_s^* + N, \quad (3)$$

$$\frac{1}{\Gamma_B} = \frac{10^{-6}}{2\pi(17,5 + 0,71\theta_{GeO_2})}, \quad (4)$$

где  $E_p$  и  $E_s$  – напряженности полей волн накачки и стоксовой (зондирующей) волны;  $\rho$  – плотность среды;  $N$  – шумовая компонента в конкретный момент времени;  $v_g$  – групповая скорость света в световоде;  $\alpha$  – коэффициент затухания сигнала;  $\Gamma_B$  – скорость затухания акустической волны, которая равна величине, обратной времени жизни фонона, и связана с шириной акустической линии;  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  – коэффициенты связи между  $E_p$ ,  $E_s$  и  $\rho$ ;  $\theta_{GeO_2}$  – концентрация оксида германия в сердцевине волоконного световода.

В последующем, уравнения (1)-(3), с учетом передачи мощности вынужденного РМБ между  $P_p$  и  $P_s$  при помощи акустической волны и акустооптического эффекта, можно выразить следующим образом:

$$\left(\frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} + \alpha\right) P_p = -g(v) P_p P_s, \quad (5)$$

$$\left(\frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} + \alpha\right) P_s = +g(v) P_p P_s, \quad (6)$$

Функция  $g(v)$  описывает спектр усиления Мандельштама-Бриллюэна, который представляет собой набор частот, описывающих РМБ в оптических волокнах. Величина  $g(v)$  также является суммой всех спектров усиления продольных акустических волн  $j$ -го порядка:

$$g(v) = \sum_j \left[ \frac{g_{B0} v_B \Delta v_B}{A_{ao}^{(j)} v_{ac}^{(j)} \Delta v_{ac}^{(j)}} \cdot \frac{(\Delta v_{ac}^{(j)}/2)^2}{\left[v - (v_0 - v_{ac}^{(j)})\right]^2 + (\Delta v_{ac}^{(j)}/2)^2} \right]. \quad (7)$$

$\Delta v_{ac}^{(j)}$  – ширина линии  $j$ -го порядка, также называемая локальным коэффициентом усиления ВРМБ;  $v_{ac}^{(j)}$  – эффективная скорость звука;  $A_{ao}^{(j)}$  – акустооптическая эффективная площадь  $j$ -го порядка. Данная величина определяет величину отклика датчика, представляющую собой перекачку

оптической мощности накачки в мощность зондирования, что также обозначают как величина усиления ВРМБ  $G(\nu, z)$ . Во многом, эта величина также определяется величинами оптических мощностей  $P_p$  и  $P_s$  (см. рисунок 1).

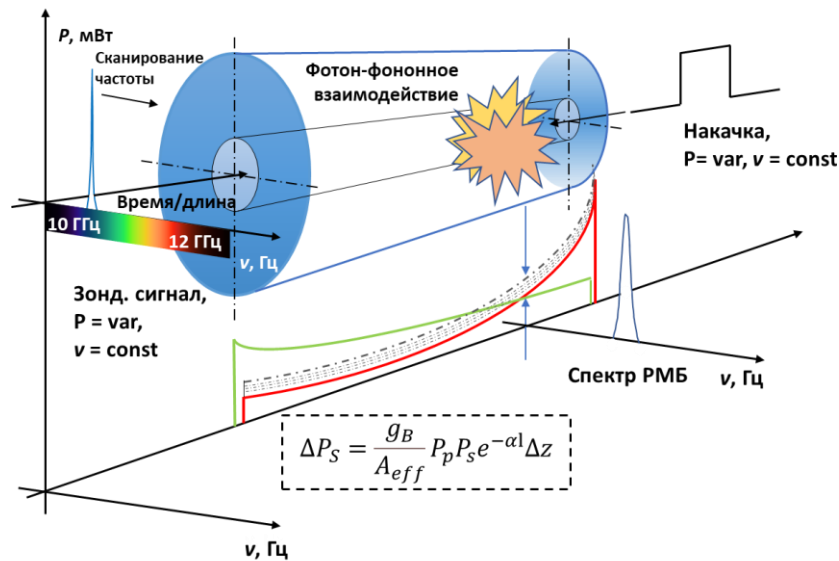


Рисунок 1 – Распространение волн накачки и зондирования в оптическом волокне.

Затем, выражение, представленное на рисунке 1 (выделенное штриховой областью), определяющее отклик датчика, можно использовать для получения оптической мощности в каждой точке световода и на каждой частоте:

$$G(\nu, z) = \frac{g_B(\nu)}{A_{ao}^{(j)}} P_p e^{(-\alpha_P z) \Delta z}, \quad (8)$$

где  $\Delta z$  – длина взаимодействия волн накачки и зондирования, на которой  $g_B(\nu)$  полагается неизменной. С учетом шумовой компоненты  $\sigma_\Sigma$  выражение для отношения сигнал-шум (SNR) можно записать следующим образом:

$$\sigma_\Sigma = (B\sigma^2 + 2qI_\Gamma B + 2F_N q(\Gamma - 1)I_\Gamma B)^{0,5} \quad (9)$$

$$SNR(\nu, z) = \frac{G(\nu, z)I_\Gamma}{(B\sigma^2 + 2qI_\Gamma B + 2F_N q(\Gamma - 1)I_\Gamma B)^{0,5}}, \quad (10)$$

где  $B$  – полоса пропускания детектора;  $\sigma^2$  – спектральная плотность мощности;  $I_\Gamma$  – постоянная компонента фототока;  $F_N$  – вклад шума оптического усилителя (EDFA);  $\Gamma$  – коэффициент усиления EDFA;  $q$  – электрический заряд.

Зная параметры, определяющие выражения (7)-(9), можно сгенерировать бриллюэновский спектр (BGS) с шумовыми компонентами.

Для определения характеристик шумовых компонент был использован набор отдельных спектров ВРМБ (снятых экспериментально), после чего из него был вычтен полезный сигнал и на основе полученных данных смоделирован шум для каждой частоты отдельно.

Статистические характеристики шумов показали, что они имеют нормальное распределение как в частотной области, так и во временной. Для строгого подтверждения гипотезы о нормальном распределении данных был



использован критерий Колмогорова-Смирнова на уровне значимости 0,05. Далее величина  $\sigma_\Sigma$ , рассчитанная в выражении (9), используется для нормировки всей шумовой компоненты.

После генерации шума и определения SNR рассчитывается ошибка детектирования в координате  $z$  волокна будет равна:

$$\epsilon(z) = \frac{1}{SNR(z)} \sqrt{\frac{(3s \Delta v_{ac})}{16\sqrt{2}(1-\eta)^{3/2}}}, \quad (11)$$

где  $s$  – шаг сканирования лазера по частоте;  $\eta$  – доля спектральной области пика, берущаяся в обработку при расчете бриллюэновского сдвига частоты (BFS или  $\nu_B$ ). Комбинируя выражения (10) и (11), получим:

$$\epsilon(z) = \frac{1}{G_{\nu_B}(z)I_\Gamma} \sqrt{\frac{3\delta \Delta v_{ac}(B\sigma^2 + 2qI_\Gamma B + 2F_N q(\Gamma - 1)I_\Gamma B)}{16\sqrt{2}(1-\eta)^{3/2}}} \quad (12)$$

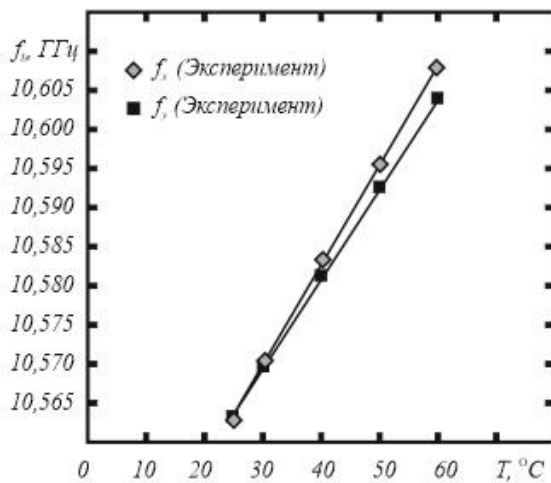


Рисунок. 2 Зависимость бриллюэновских сдвигов  $\Delta\nu_x$  и  $\Delta\nu_y$  от температуры, полученная во время калибровочного эксперимента.

По величинам  $\epsilon(z)$  и  $SNR(z)$  определяются: точности измерения температур и деформаций в случае функционирования волокна в качестве сенсора; точность разделения температур и деформаций. Во многом это зависит от точности калибровочного замера, в ходе которого определяются чувствительности обеих поляризационных осей. Изменение частоты ВРМБ при потенциальном приложении

температурных или деформационных воздействий можно описать формулой:

$\begin{pmatrix} \Delta\nu_x \\ \Delta\nu_y \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{pmatrix}$ , где  $\Delta\nu_x$ ,  $\Delta\nu_y$  – изменения частоты ВРМБ для двух поляризационных осей волокна, вызванные термическими  $\Delta T$  и механическими  $\Delta\varepsilon$  факторами;  $A$  – матрица коэффициентов чувствительности:  $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ . Для вычисления коэффициентов необходимо провести калибровку датчика, приложив известные по величине воздействия температур и деформаций.

На рисунке 2 представлены зависимости частотного сдвига от воздействия температуры для каждой поляризационной оси. Зависимость от деформации носит схожий характер.

Наклоны прямых определяют величину коэффициентов чувствительности. Стоит отметить, что ошибки при вычислении коэффициентов, вызванные погрешностью измерений, внесут изменения в полученные значения температурных и деформационных воздействий.

На рисунке 3 показана зависимость ошибки определения температуры от погрешности ввода коэффициентов матрицы. Зависимость неодинаково чувствительна для разных коэффициентов.

Также исследуется влияние SNR и шага сканирования на качество разделения температуры и деформации (рисунок. 4). Показано, что для получения точности измерения температуры (отдельно от деформаций) в несколько °С необходимо выполнение двух условий:  $SNR > 30$  дБ и шаг сканирования по частоте 0,5 МГц.

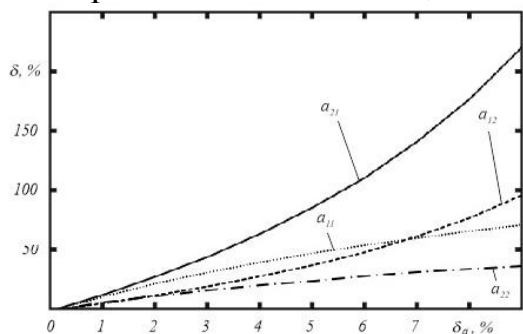


Рисунок 3 – Зависимость погрешности расчетного эксперимента от погрешности ввода калибровочных коэффициентов.

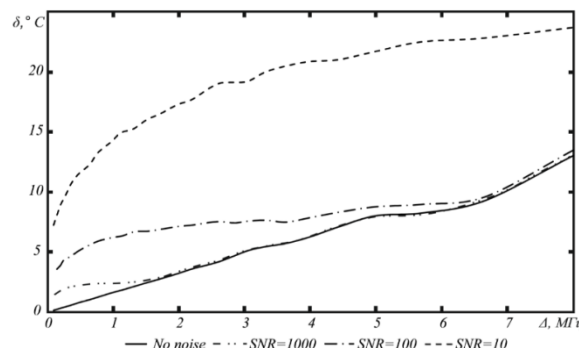


Рисунок 4 Расчетные погрешности определения температуры в зависимости от шага сканирования и отношения сигнал-шум.

Таким образом, по величинам  $\epsilon(z)$  и  $SNR(z)$  определяются и фиксируются прогнозируемые точности измерения и разделения физических величин. Выражения (7)-(12) были применены в программной реализации модели и использовались дважды: для быстрой оси поляризации и для медленной. Результат ее работы представлен на рисунке ниже.

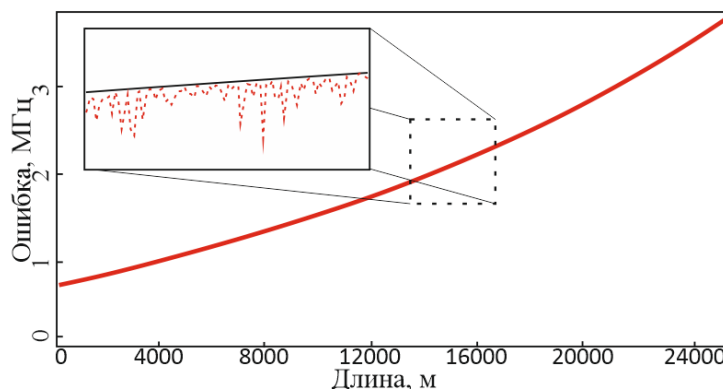


Рисунок 5 – Ошибка детектирования BFS по длине световода (моделирование).

На рисунке 5 показан результат определения ошибки детектирования частотного сдвига ВРМБ в каждой точке волокна, вычисленный на двух этапах (чёрная линия — на этапе моделирования без генерации спектров, красная линия — после генерации спектров).

**Третья глава** посвящена разработке метода обработки спектра рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, а также методики оценки эффективности автоматизированного детектирования бриллюэновского сдвига.

В предыдущих главах говорилось о широкой вариативности методов обработки бриллюэновских спектров в системах распределенного мониторинга температуры и деформации, но все они не лишены некоторых

недостатков, будь то недостаточная точность определения максимума, либо слишком усложненная реализация алгоритма расчетов.

Необходимо разработать метод, сочетающий в себе простоту реализации, с сохранением повышенной точности обработки спектров в условиях высокой зашумленности и наличия непредвиденных дефектов.

Имея сигнал  $P$ , состоящий из дискретного набора выборок  $N$ , каждая из которых регистрирует мощность обратного рассеяния на определенной частоте (рисунок 6а), можно задать ему «обратный сигнал»  $P'$ , описанный как  $P'_i = P_{2N-i}$ , а «обратный и смещенный» сигнал  $P''(k)$  как  $P''_i = P'_{i-k}$ , учитывая, что  $P'' = 0$ , если  $[i-k]$  находится вне диапазона  $[0, 2N]$  (рисунок 6б). Здесь  $k$  - сдвиг сигнала, который может принимать все виды целочисленных значений от  $-2N$  до  $2N$ ,  $i$  – номер выборки в спектре.

Свертка сигналов  $P$  и  $P''$  может быть описана следующим образом:

$$X = \sum_{i=0}^{2N} P_i * P''_i = \sum_{i=0}^{2N} P_i^s * P''_i^s + \sum_{i=0}^{2N} P_i^n * P''_i^s + \sum_{i=0}^{2N} P_i^s * P''_i^n + \sum_{i=0}^{2N} P_i^n * P''_i^n \quad (13)$$

По графику зависимости величины  $X$  (рисунок 6с) можно определить при какой величине сдвига будет достигнут максимум (в случае его наличия), и, впоследствии, частоту максимума BGS. Осталось определить, имеет ли искомая функция четко локализуемый максимум. Для этого запишем выражение корреляционных функций двух функций Лоренца в аналитическом виде:

$$I(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{w^2 \pi^{-2}}{[(f - f_b)^2 + w^2][(f - f_b - \delta)^2 + w^2]} df \quad (14)$$

По теореме о вычетах:

$$I = 2i \frac{w^2}{\pi} \left[ \frac{1}{2iw[-2iw\delta + \delta^2]} + \frac{1}{2iw[2iw\delta + \delta^2]} \right] = \frac{w}{\pi} \left[ \frac{2\delta^2}{[2iw\delta - \delta^2][2iw\delta + \delta^2]} \right] = \frac{(2w)}{\pi} \left[ \frac{1}{[(2w)^2 + \delta^2]} \right] = \frac{W}{\pi} \left[ \frac{1}{[W^2 + \delta^2]} \right] \quad (15)$$

где  $W$  – ширина профиля BWC.

Очевидно, что выражение (15) является также функцией Лоренца, а следовательно, имеет четко локализуемый максимум, причем связанный с искомой величиной. Более того, лоренцевидный полученный сигнал дает возможность «встраивания» метода в уже применяемые исследователями цепи обработки (метод аппроксимации лоренцевой функцией, о нем будет рассказано далее).

Следующей ставится задача сравнения точности разработанного метода с известными подходами в условиях экстремального оптоэлектронного и цифрового зашумления.

Для проведения оценки точности были сгенерированы два набора данных, представляющих собой спектры ВРМБ с различными дефектами. В спектрах из первого набора случайным образом варьировался SNR в пределах от 2 до 20 дБ.

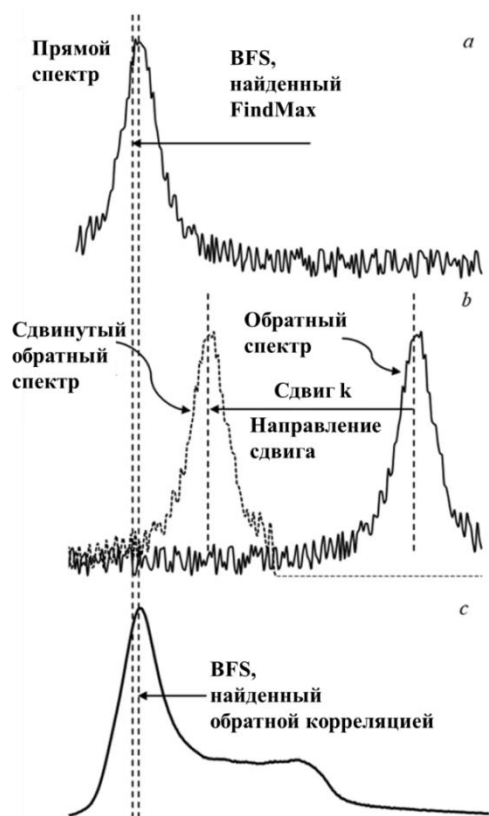


Рисунок 6. Принцип работы нового метода (а-прямой спектр; б-обратный спектр со смещенной копией; с-обратная корреляционная функция и ее BFS).

корреляционного метода (ССМ), а также, разработанного метода обратной корреляции (BWC).

Для второго набора данных было рассмотрено два из возможных типов проявления дефекта. Первый – когда дефект проявлялся в областях, не содержащих максимум функции; второй – максимум всегда находится в границах дефекта.

Для обработки результатов спектры были поделены на три группы по соотношению сигнал-шум (SNR). В первую группу вошли спектры с низким SNR (до 5 дБ), во вторую – со средним SNR (5-10 дБ), а в третью – с высоким SNR (> 10 дБ).

Отмечено, что алгоритм LCF показал эффективность при высоких SNR в случаях, когда дефект не попадал в область максимума. Во всех остальных случаях более эффективными оказались корреляционные методы.

Тем не менее, в реальных коммерческих системах мониторинга обнуление данных случается достаточно редко, но может встречаться при экспериментах на макетных установках. В связи с этим был рассмотрен случай, когда такой дефект проявляется в спектре с некоторой вероятностью.

В результате расчета точности системы были получены графики, представленные на рисунке 7. Согласно этим графикам, начиная с 9%-ной вероятности возникновения дефекта (выделенная кругом область), метод BWC показывает лучшие результаты по точности определения максимума

Во втором наборе спектров содержался дефект, который приводил к занулению данных в случайной области спектра. Для выражения такой функции можно воспользоваться формулой:

$$P(f) = \left( P_N + \frac{W}{\pi} \left[ \frac{1}{[W^2 + f^2]} \right] \right) \left[ 1 + \frac{(f-\mu)|f-\nu|}{(f-\nu)|f-\mu|} \right], \quad (16)$$

где  $\mu$  – частотная координата начала цифрового провала сигнала;  $\nu$  – частотная координата конца цифрового провала сигнала, причем  $\nu$  всегда больше  $\mu$  и задана случайно в пределах полезного сигнала спектра;  $W$  – масштабный коэффициент спектральной функции, отвечающий за ширину спектра и амплитуду полезного сигнала;  $P_N$  – амплитуда шумовой составляющей сигнала.

Далее осуществлялась математическая обработка спектров при помощи аппроксимации функцией лоренца (LCF), классического взаимно-

бриллюэновского спектра в сравнении с методом ССМ. Алгоритм LCF, при этом, сразу теряет свою актуальность при проявлении дефекта.

На рисунке 8 также представлено сравнение точности различных алгоритмов применительно к реальным спектрам с достаточно высоким SNR ( $> 10$  дБ).

В результате показано, что разработанный метод «обратной корреляции» действительно способен обеспечивать лучшую точность определения максимума бриллюэновского спектра в условиях высокой зашумленности и наличия дефектов в спектрах.

Это делает его основным претендентом на использование в составе автоматизированной системы измерения бриллюэновских спектров.

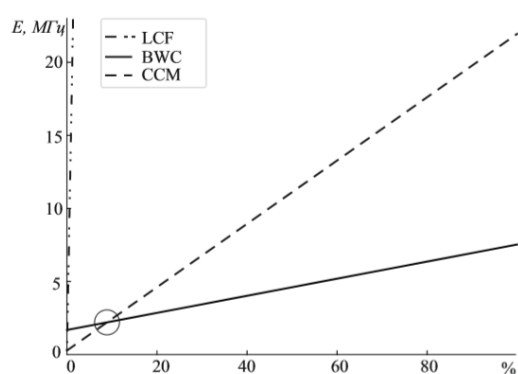


Рисунок 7. Ошибка определения максимума BGS в зависимости от вероятности появления артефакта.

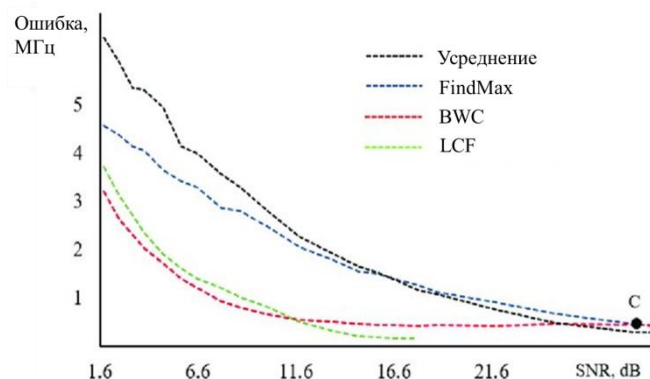


Рисунок 8 – ошибка отклонения бриллюэновского сдвига на реальных измерениях (при высоком SNR).

**Четвертая глава** посвящена проектированию программно-аппаратной автоматизированной системы распределенного детектирования бриллюэновского сдвига. На любом современном автоматизированном производстве, в том числе волоконных световодов, оперативный и точный технический контроль качества с минимально возможным временем измерений является одним из ключей к улучшению эксплуатационных характеристик изделий и снижению затрат.

Для уменьшения временных затрат предлагается использовать АСИ, представленную на рисунке 9.

После вытяжки оптического волокна из заготовки проводится измерение оптических и геометрических параметров на торцах волокна. К таким параметрам относится профиль показателя преломления для двух осей поляризации. По полученным данным программное обеспечение прогнозирует ошибку определения положения максимума ВРМБ путем симуляции ВРМБ в таком волокне и генерации спектров для каждой поляризационной оси. В случае если обеспечивается необходимое время измерения и допустимая погрешность измерения, проводится измерение реальных бриллюэновских спектров на бриллюэновском анализаторе для данного волокна. Далее по ним рассчитывается SNR и прогнозируемая ошибка.

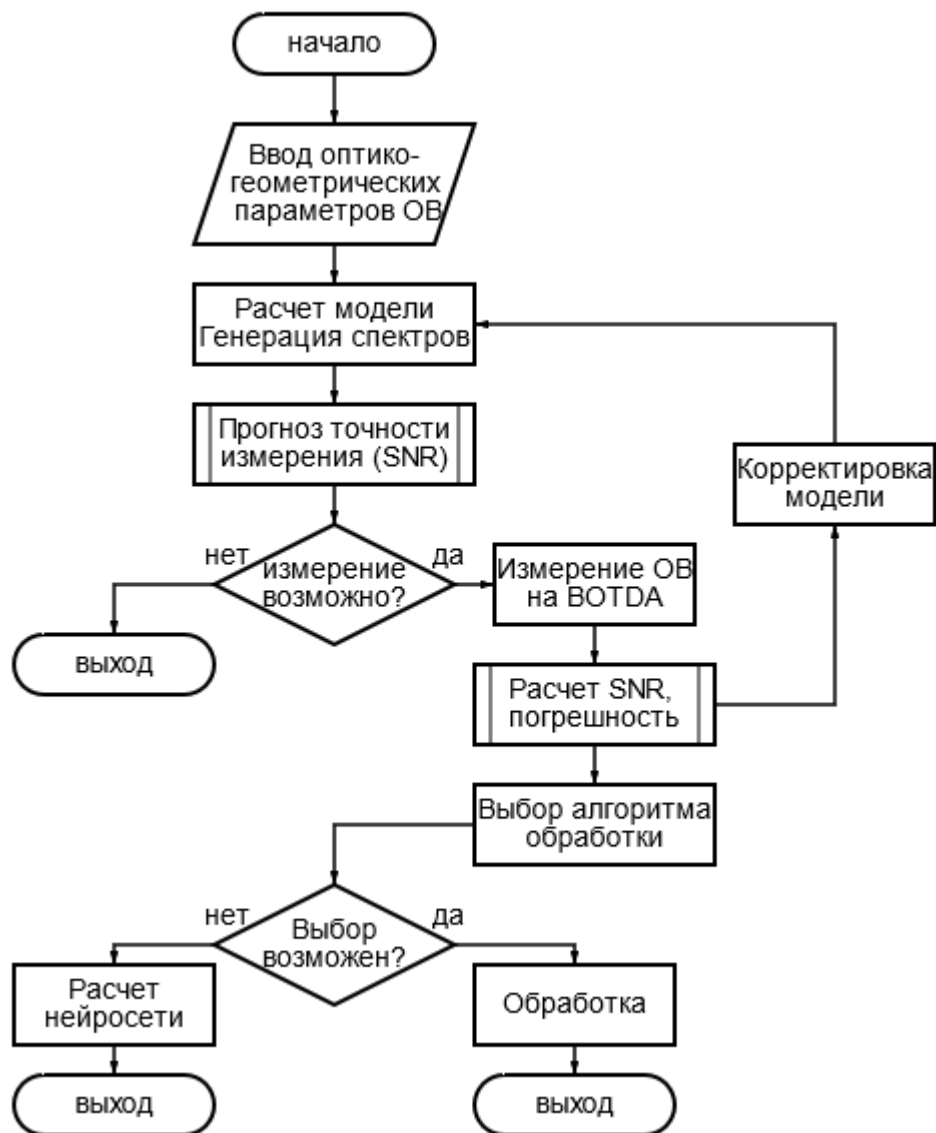


Рисунок 9 – Схема работы автоматизированной системы измерения пространственного распределения бриллюэновского сдвига частоты в волоконном световоде.

Если обнаруживается значительное несоответствие между данными модели и эксперимента, то в модель вносятся корректирующие коэффициенты. Корректировка может быть также введена с учетом возможной скрутки оптического волокна в процессе перемотки его на технологическую оснастку. Величина корректировки вычисляется путем расчета напряженностей электрического поля, соответствующих двум поляризационным модам в оптическом волокне. Такой расчет целесообразно осуществлять при помощи матричного формализма Джонса. В зависимости от измеренного SNR выбирается метод вычисления частоты максимума бриллюэновского спектра. Поскольку оптимальные для каждого метода диапазоны SNR покрывают не всю шкалу возможных отношений сигнал-шум, при невозможности точного выбора лучшего алгоритма система прибегает к нейросетевому алгоритму.

На вход нейросетевого алгоритма подаются частоты, полученные в результате работы трех методов поиска максимума спектра, а также значение

отношения сигнал/шум спектра и иная вспомогательная информация. Для обучения сети системой по принципу обратного распространения ошибки было сгенерировано 2000 спектров с различными SNR, частотой сдвига пика ВРМБ, а также иными особенностями спектра ВРМБ. Соотношение между обучающей и тестовой выборкой составило 75 и 25 % соответственно. Способом итерационной вариации настроечных характеристик нейросетевого алгоритма было установлено, что оптимальную точность детектирования пика ВРМБ обеспечивает четырехслойный персептрон с двумя скрытыми слоями по 50 и 25 нейронов. В качестве функции активации нейронов использовалась сигмоидальная функция.

В результате работы сети было получено улучшение точности определения максимума бриллюэновского спектра около 10%. Сравнительные характеристики методов расчета максимума для смоделированных спектров приведены в таблице 2.

Таблица 2. Точность определения сдвига ВРМБ

Метод	Стандартное отклонение ошибки, МГц
BWC	7,2
CCM	7,1
LCF	8,6
Комбинированный (Нейросеть)	6,4

Помимо прочего, был опробован еще один способ комбинации стандартных методов поиска сдвига ВРМБ с методами машинного обучения.

Использование метода обратной корреляции совместно с обобщенной линейной моделью позволило увеличить точность определения сдвига ВРМБ на величину до 0.428 МГц для всех

соотношений сигнал-шум полученных спектров рассеяния. А в случае экстремально зашумленных сигналов разница между одиночной и двойной обработкой составила 1.6 МГц в пользу двойной обработки спектров. На рисунке 10 представлено сравнение точности при одиночной и двойной обработке спектров ВРМБ.

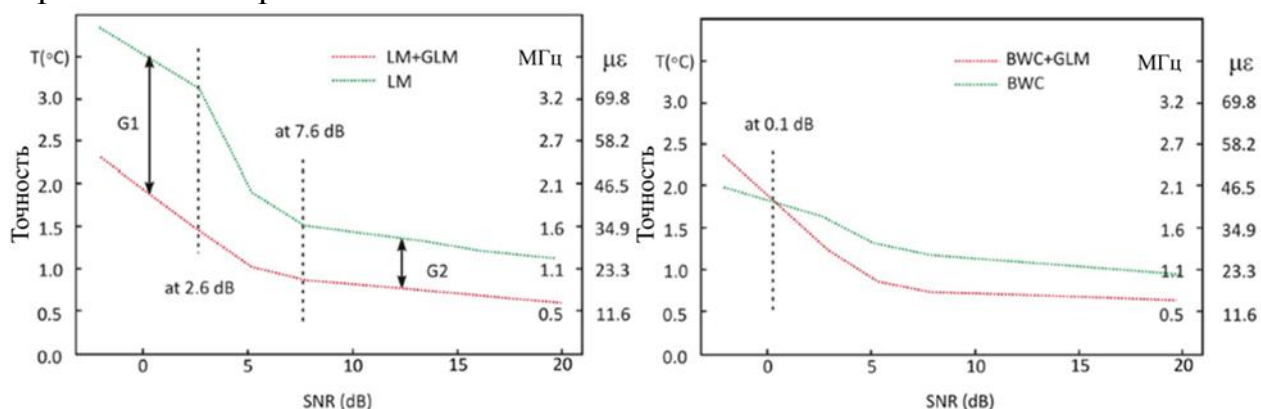


Рисунок 10. Сравнение точности определения ВРМБ при использовании одиночной и двойной обработки. А) с использованием LCF Б) с использованием BWC

**В заключении** подведен итог результатов исследований, а также сформулированы основные выводы.

### Основные результаты работы

1. Проведен анализ современного состояния проблемы разработки и производства волоконных чувствительных элементов, на основе специальных волоконных световодов, для высокоточных систем распределенного мониторинга. Показано, что процесс изготовления специальных анизотропных ВС типа «Панда» сопряжен с различными трудностями, возникающими в процессе производства. Качество производимых ВС напрямую влияет на точность производимых на их основе распределенных датчиков;

2. Разработанная программная реализация модели ВРМБ, учитывающая возможность распространения излучения по двум поляризационным осям ВС, позволяет оценить ошибку определения сдвига ВРМБ в специальных ВС. Модель учитывает инструментальные погрешности используемых в производстве рефлектометров. Функционал модели используется в автоматизированной системе измерений параметров специальных волоконных световодов.

3. Разработан алгоритм автоматизированного измерения параметров оптических волокон, сохраняющих состояние поляризации вводимого излучения. Алгоритм реализован с использованием типовой аттестованной системы распределенного мониторинга, не требует усложнения аппаратной части сенсора, а также позволяет встраивание в АСИ.

4. Разработанный метод обратной корреляции для обработки спектров рассеяния Мандельштама-Бриллюэна продемонстрировал эффективность нахождения частоты бриллюэновского сдвига в случае экстремально низких соотношений сигнал-шум, а также наличия дефектов оцифровки в автоматизированной системе измерений.

5. Проведенная оценка точности определения сдвига рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, в условиях экстремального зашумления, позволила выявить оптимальные условия для использования различных подходов к детектированию сдвига рассеяния. Оценка была проведена с использованием единого набора данных.

6. Спроектирована и апробирована автоматизированная система измерений, включающая нейросетевой алгоритм, а также позволяющая комбинировать различные подходы к детектированию сдвига спектра рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Применение разработанной системы позволило повысить точность определения параметров специальных волоконных световодов на величину порядка 10%.



**Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:**

*Опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК (по направлению):*

1. **Кривошеев А.И.**, Константинов Ю.А., Первадчук В.П., Барков Ф.Л. Комбинированный нейросетевой метод определения максимума бриллюэновского спектра в распределенных волоконно-оптических датчиках // Прикладная математика и вопросы управления. - 2021. - №3. - С. 95-106.

*Научные статьи, опубликованные в журналах, входящих в МБЦ:*

2. Nordin N.D., Abdullah F., Zan M.S.D., A Bakar A.A., **Krivosheev A.I.**, Barkov F.L., Konstantinov Y.A. Improving Prediction Accuracy and Extraction Precision of Frequency Shift from Low-SNR Brillouin Gain Spectra in Distributed Structural Health Monitoring // Sensors. - 2022. - №7 (22). - P. 2677.

3. Barkov F.L., Konstantinov Y.A., **Krivosheev A.I.** A Novel Method of Spectra Processing for Brillouin Optical Time Domain Reflectometry // Fibers. - 2020. - №8. - P. 60.

4. Barkov F.L., Konstantinov Yu.A., Bochkova S.D., Smirnov A.S., Burdin V.V., **Krivosheev A.I.**, Nosova E.A., Smetannikov O.Yu. Modelling of polarised optical frequency domain reflectometry of axially twisted anisotropic optical fibres // Quantum Electronics. - 2019. - №49(5). - P. 514-517.

5. Barkov F.L., Konstantinov Yu.A., Burdin V.V., **Krivosheev A.I.** Theoretical and experimental estimation of the accuracy in simultaneous distributed measurements of temperatures and strains in anisotropic optical fibers using polarization-brillouin reflectometry // Instrum. Exp. Tech.. - 2020. - №4. - P. 487-493.

6. **Krivosheev A.I.**, Konstantinov Yu.A., Barkov F.L., Pervadchuk V.P. Comparative Analysis Of The Brillouin Frequency Shift Determining Accuracy In Extremely Noised Spectra By Various Correlation Methods // Instrum. Exp. Tech.. - 2021. - №5. - P. 715-719.

7. Burdin V.A., Konstantinov Yu. A., Claude D., Latkin K.P., **Krivosheev A.I.**, Tsibinogina M.K. Multistage Quality Control of Active Fiber Light Guides // Instrum. Exp. Tech.. - 2021. - №5. - P. 768-775.

8. **Krivosheev A.I.**, Barkov F.L., Konstantinov Yu.A., Belokrylov M.E. State-of-art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing (review) // Instrum. Exp. Tech. – 2022. – Vol. 65. – No. 5. – P. 687-710.

9. **Krivosheev A.I.**, Konstantinov Yu.A., Krishtop V.V., Turov A.T., Barkov F.L., Zhirnov A.A., Garin E.O., Pnev A.B. A Neural Network Method For The BFS Extraction // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, 20-24 June 2022. – 2022.

10. Belokrylov M.E., Konstantinov Yu.A., **Krivosheev A.I.**, Turov A.T., Stepanov K.V., Garin E.O., Pnev A.B., Fotiadi A.A. A Single-Scan PM-Fibers Polarization Axes Study // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, 20-24 June 2022. – 2022.

*Публикации в других изданиях:*

11. Смирнов А.С., **Кривошеев А.И.**, Константинов Ю.А., Барков Ф.Л., Бурдин В.В. Разделение температуры и деформации в волокне, сохраняющем поляризацию, методом поляризационного распределенного бриллюэновского анализа // Фотон Экспресс. - 2017. - № 6 - С. 183.
12. **Кривошеев А. И.**, Носова Е.А., Константинов Ю.А., Барков Ф.Л., Бурдин В.В., А.С. Смирнов Быстрое индикаторное измерение температур и деформаций методом поляризационно-бриллюэновской рефлектометрии // Фотон Экспресс Наука. - 2019. - № 6 - С. 310-311.
13. **Кривошеев А.И.**, Барков Ф.Л., Константинов Ю.А. Контроль ВОЛС методом бриллюэновской рефлектометрии: проблемы и возможные решения // ПЕРВАЯ МИЛЯ. - 2020. - № 7-8. - С. 37-44.
14. Белокрылов М.Е., **Кривошеев А.И.**, Константинов Ю.А., Туров А.Т. Распределённое одноимпульсное исследование поляризационных осей анизотропных оптических волокон // Фотон Экспресс. - 2021. - № 7. - С. 16-18.
15. Белокрылов М.Е., Константинов Ю.А., **Кривошеев А.И.** Сравнение результатов измерений модового двулучепреломления РМ-волокон методом поляризационно-бриллюэновской рефлектометрии, выполненных двукратным и однократным сканированием // Фотон Экспресс. - 2021. - № 8 - С. 10-13.
16. Константинов Ю.А., **Кривошеев А.И.**, Барков Ф.Л. Автоматизированная система измерений для распределенного исследования бриллюэновского сдвига в РМ-волокнах в условиях производства // ПЕРВАЯ МИЛЯ. – 2022. – № 6. – С. 78-83.
17. **Кривошеев А.И.**, Константинов Ю.А. Создание элементов автоматизированной системы измерения бриллюэновского сдвига оптических волокон в условиях промышленного производства // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. - 2021. - №4. - С. 37-48.
18. Смирнов А.С., **Кривошеев А.И.**, Носова Е.А., Бочкова С.Д., Барков Ф.Л., Бурдин В.В., Константинов Ю.А. Теоретические аспекты проектирования автоматизированных исследовательских систем на принципах оптической рефлектометрии временной и частотной области // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. - 2018. - №4. - С. 8-13.
19. **Кривошеев А.И.**, Носова Е.А., Лобач И.А., Клод Д., Константинов Ю.А., Барков Ф.Л. Наблюдение «отражающих событий» на участках микроизгибных деформаций одномодового световода при помощи специальной модификации релеевского рефлектометра // Оптическая рефлектометрия – 2018 Тезисы докладов II Всероссийской конференции – 2018 – С. 30-33.
20. Смирнов А.С., Барков Ф.Л., Константинов Ю.А., **Кривошеев А.И.** Способ корреляционной пост-обработки данных, получаемых с приборов обратного рассеяния // Оптическая рефлектометрия - 2016 Тезисы докладов I Всероссийской конференции – 2016 – С. 58-59