

ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
профессор Первадчук В.П.

Пермь 2022

Оглавление

Введение.....	4
1. Общие положения и состояние проблемы.....	10
1.1. Автоматизация контроля качества производства оптического волокна в условиях промышленного производства.....	10
1.2. Бриллюэновская рефлектометрия как метод контроля СВС	15
1.3. Аппаратные методы увеличения точности детектирования BFS.....	23
1.4. Корреляционные методы обработки BGS	31
1.5. Методы аппроксимации лоренцевой функцией.....	38
1.6. Методы искусственного интеллекта в детектировании BGS	42
Выводы по главе 1	49
2. Модель погрешности вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в СВС и ее программная реализация	51
2.1. Анализ шумовых компонент спектров ВРМБ и точности определения сдвига рассеяния	54
2.2. Определение точности детектирования температур и деформаций при помощи волоконного распределенного датчика	58
Выводы по главе 2	64
3. Разработка метода обработки спектров бриллюэновского рассеяния	66
3.1. Метод обратной корреляции	66
3.2. Первичная оценка точности метода.....	71
3.3. Сравнение точности методов	73
3.4. Тестирование метода обратной корреляции в рамках взаимодействия с другими подходами детектирования сдвига бриллюэновской частоты	83
Выводы по главе 3	84

4. Автоматизированная система измерения пространственного распределения бриллюэновского сдвига частоты в волоконном световоде.....	86
4.1. Общая концепция системы.....	86
4.2. Интеграция методов машинного обучения в автоматизированную систему.....	92
4.2.1. Классическая нейронная сеть прямого распространения.....	92
4.2.2. Обобщенная линейная модель.....	94
4.3. Результаты эксплуатации элементов АСИ в технологическом процессе.....	100
Выводы по главе 4.....	101
Заключение.....	102
Список литературы.....	104
Приложение А.....	122

Введение

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. J. 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 122 страницы, включая 47 рисунков.

1. Общие положения и состояние проблемы

1.1. Автоматизация контроля качества производства оптического волокна в условиях промышленного производства

В настоящее время, изготовление стандартных телекоммуникационных световодов [1], удовлетворяющих современным стандартам, не является недостижимой задачей. В свою очередь, производство специальных ВС (СВС), например, световодов «Панда», накладывает более жесткие требования [2].

Производство ВС происходит путем вытяжки специально изготовленной, методом MCVD, преформы. Осаждение редкоземельных элементов внутри опорной трубы формирует заданный показатель преломления преформы, и, в дальнейшем, сердцевины оптического волокна. Производство преформ может сопровождаться различными нестабильностями, приводящими к отклонениям параметров преформы от заданных [3]. Эти нестабильности могут приводить к различным дефектам и неоднородностям, таким как трещины, капилляры и др. [2].

В ВС типа «Панда», анизотропия свойств сердцевины достигается за счет напряженного состояния, вызванного нагружающими стержнями. Эти стержни также изготавливаются методом MCVD, а, следовательно, наследуют все те же недостатки, присущие сердцевине волокна.

Известно, что при вытяжке ВС дефекты, внесенные при производстве преформы, останутся в ВС, а также могут привести к другим дефектам или обрывам волокна. Сам по себе процесс вытяжки ВС является сложной задачей [4, 5]. Вытяжка происходит в специальной башне, в которой закрепляется преформа и медленно подается в печь, где происходит нагрев и размягчение. Контроль скорости вытяжки является определяющим для получения требуемого диаметра ВС. Автоматизация процесса вытяжки является актуальной задачей, которой посвящено множество исследовательских работ [2, 6, 7]. Тем не менее, несмотря на предлагаемые

решения, нестабильность процесса производства СВС часто приводит к отклонениям оптических параметров вдоль длины световода. Отклонения такого рода возможно контролировать при помощи оптических рефлектометров [8, 9], которые способны регистрировать свойства рассеянного в волокне излучения.

Использование СВС в составе распределенных датчиков накладывает еще более строгие требования к качеству используемых СВС. Как было сказано выше, нагружающие стержни, используемые в световодах типа «Панда» для наведения двулучепреломления, могут иметь различные дефекты, ухудшающие характеристики СВС, а вследствие и качество распределенного датчика.

Основной параметр, характеризующих анизотропные ВС – параметр сохранения поляризации излучения (СПИ) [10]. Основная характеристика, влияющая на величину СПИ – двулучепреломление. Стоит отметить, что получение распределенной величины двулучепреломления в настоящее время является нетривиальной задачей. Зачастую, в условиях производства ограничиваются измерением величины двулучепреломления на торцах ВС.

Таким образом, для создания высокоточных распределенных датчиков на основе СВС, необходимо применение такого метода оптической рефлектометрии, который способен дать информацию о двулучепреломлении вдоль волоконной линии.

Один из методов распределенного контроля СПИ в ВС – поляризационная рефлектометрия (POTDR) [11]. В простейшем случае этот метод представляет собой стандартный рефлектометр, фиксирующий рассеяние Рэлея в ВС, к которому подсоединен оптический поляризатор и анализатор [8]. Более подробно работа такого рефлектометра описана в работах [12, 13]. В свою очередь, такая модификация может существенно

снизить динамический диапазон системы, повысить шумы и ограничить его применение.

С этой точки зрения встает вопрос разработки не только способа распределенной регистрации параметров в СВС, но и новых методов обработки, позволяющих работать в условиях пониженного динамического диапазона системы и высокой зашумленности. Стоит отметить, что в условиях современного производства, для повышения качества производимой продукции, все методы и системы должны быть объединены в единую автоматизированную систему измерения, позволяющую обеспечить высокое качество производимой продукции.

К сожалению, обзор автоматизированных систем измерения, подобных проектируемой, на основании открытых источников достаточно проблематичен, поскольку подобные исследования зачастую косвенно содержат информацию о качестве производимой теми или иными структурами продукции. Из достаточно близко связанных работ можно выделить две диссертационные работы, преследующих схожие научные цели. Фактически, эти работы были предыдущими ступенями построения полного автоматизированного цикла создания специальных волоконных световодов. Так, в диссертации Крюкова, 2006 [6] изложены основы проектирования автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) изготовления преформы методом MCVD и последующей вытяжки оптического волокна. Представлены математические модели для оценки внутренних напряжений заготовок, что позволяет спрогнозировать профиль показателя преломления ОВ после вытяжки. Тем не менее работа не затрагивает тему контроля качества уже вытянутого ОВ.

Это направление работ получило развитие в диссертационной работе Константинова, 2012 [14], в которой изложены основы автоматизированного контроля качества СВС, после вытяжки, методами оптической рефлектометрии, что позволяет проводить контроля волокон вдоль всей

длины. Представлены модифицированные методы, основанные на применении корреляционных алгоритмов, что позволило повысить точность результатов контроля. Тем не менее, в данной работе не уделено внимание применению методов и систем бриллюэновской рефлектометрии для анализа качества СВС.

Следующие работы, представленные в данном разделе литературного обзора, не связаны напрямую с решаемой задачей, однако, в некоторой степени из них можно почерпнуть единые подходы к хранению и передаче информации в АСИ, архитектуру самой автоматизированной системы, а также отдельные технические решения, реализованные в качестве элементов АСИ. Так, например, в работе [15] волоконно-оптический рефлектометр используется в качестве основы для автоматизированной системы контроля параметров ОВ и волоконных кабелей. Тем не менее, рефлектометрический контроль ОВ не дает информацию об отклонениях технологических параметров ОВ, а, следовательно, не может дать информацию для автоматизированного принятия решения по корректировке тех или иных конструкторских или технологических параметров производственного процесса. Похожие системы были спроектированы для контроля таких операций как вытяжка ОВ или процесс производства преформ методом MCVD. Производители оборудования для изготовления преформ разрабатывают системы для автоматизации сбора и хранения данных [16]. В итоге, можно констатировать, что полноценных систем, позволяющих управлять и контролировать качество на всех этапах производства СВС, а также способных автоматически принимать решения в ходе технологического процесса, в литературе не представлено.

В работе [17] автором показана автоматизированная система контроля качества и диагностики неисправностей радиоэлектронной аппаратуры. Приведена схема производства радиоэлектронного модуля, а также схема программно-аппаратного комплекса контроля качества и диагностики

неисправностей. Кроме того, пошагово приведены производственные операции и алгоритмы межоперационного контроля. Особое внимание автором уделено созданию единой базы данных для контроля прохождения изделия по технологическому процессу. В [18] представлен программно-аппаратный комплекс автоматизации производства приборов микро- и оптоэлектроники. Комплекс позволяет исследовать полупроводниковые приборы различными методами во время одного измерительного цикла. В обеих работах [17, 18] авторы применяют новые методики метрологического контроля, позволяющие повысить эффективность работы системы.

В работе [19] автором описана автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом высокоточной обработки деталей. В работе представлена методика построения многоуровневой структуры изделия на основе математического моделирования инструментов и оборудования. Эта задача имеет большое значение и в волоконной оптике, поскольку обработка стеклянных заготовок, травление и сверление требуют высокой точности. В [20] представлена экспертная система и база данных, способная визуализировать заготовки на основе их параметров. С применением объектно-ориентированного подхода описан принцип объединения экспертной системы с PDM-системой (системой управления данными об изделии), а также CAD-системой (системой компьютерной поддержки проектирования). Работа [21] также посвящена высокоточной обработке деталей. В работе представлена математическая модель, основанная на методах нечеткой логики, позволяющая автоматизировать контроль и управление технологическим процессом. Нечеткая логика [22] приближенно имитирует рассуждения человека при принятии решений для применения их в автоматизированных системах.

В работах [23, 24] описан технологический процесс производства волоконно-оптических кабелей, а также аспекты автоматизированного контроля эксплуатационных характеристик. В [23] описан процесс

разработки программного обеспечения (ПО) для конструирования новых волоконных кабелей, уделено внимание интеграции ПО в уже действующие системы или производственные линии, имеющие возможность введения автоматизации. В [24] уделено внимание вопросу создания базы данных, содержащей в себе всю информацию о стадиях производства оптического кабеля.

В работе [25] авторами представлен автоматизированный технологический комплекс для производства цифровых волоконно-оптических преобразователей перемещений. Разнесенные во времени этапы производства, объединены общей системой контроля, при этом контроль и анализ характеристик изделий осуществляется посредством моделирования процедур поверочных испытаний.

Научные подходы, представленные в описанных выше работах, могут быть точно заимствованы при проектировании структуры и отдельных элементов АСИ. Ключевым из них будет являться модуль детектирования бриллюэновского сдвига в СВС, где важнейшую роль играет сам метод его определения. Следующие разделы обзора будут посвящены аппаратным и программным мерам, направленным на решение этой задачи.

1.2. Бриллюэновская рефлектометрия как метод контроля СВС

Методы волоконно-оптического контроля физических величин широко применяются в различных сферах науки и техники [26-30]. Особое внимание заслужили методы оптической рефлектометрии, которые позволяют получить информацию о характеристиках оптического волокна и величине внешних факторов, воздействующих на него, в каждой точке по его длине [31-38].

Одно из наиболее перспективных направлений оптической рефлектометрии – распределенный контроль волоконных световодов (ВС) методом анализа спонтанного и вынужденного рассеяния Мандельштама-

Бриллюэна (РМБ). Устройства, работающие на первом принципе, называются бриллюэновскими рефлектометрами (Brillouin optical time domain reflectometer – BOTDR), на втором – анализаторами (Brillouin optical time domain analyzer – BOTDA). Принцип их функционирования показан на рисунке 1.1 [39].

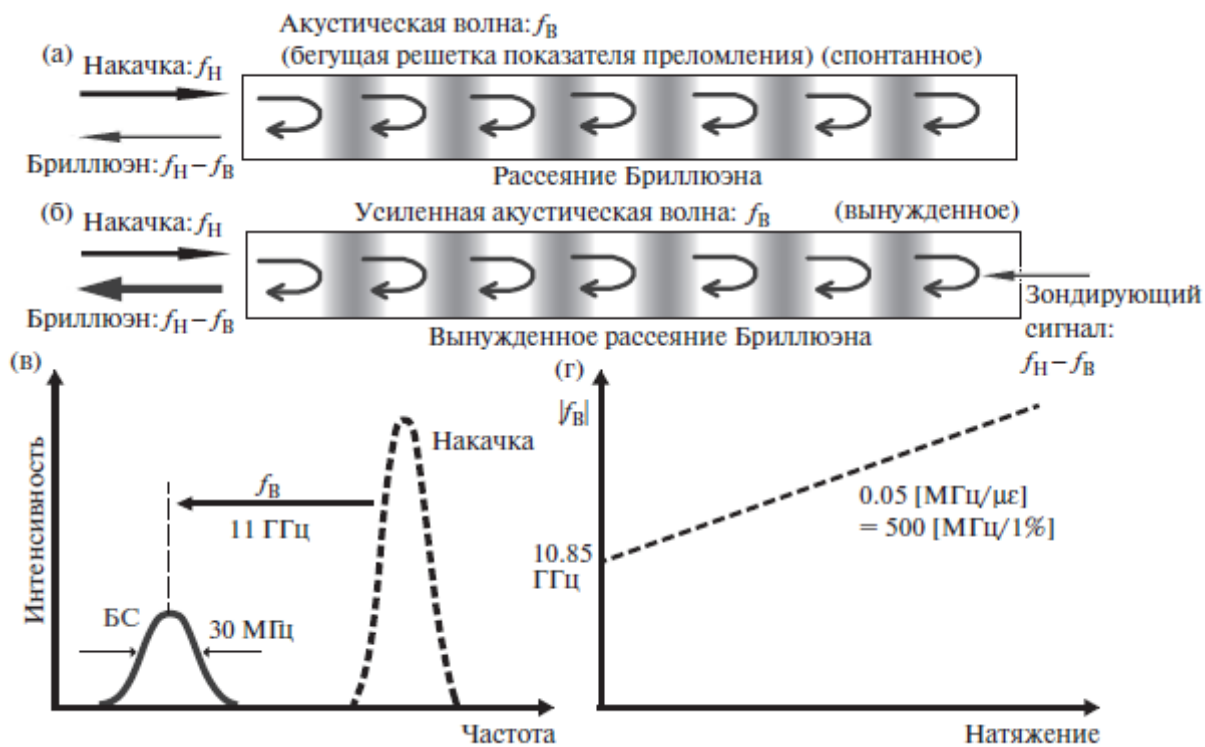


Рисунок 1.1 Принцип работ систем BOTDA и BOTDR [39]. БС – Бриллюэновский спектр.

В системах BOTDA оптическое излучение высокой мощности, введённое в оптическое волокно, порождает акустическую волну (явление электрострикции), при этом, частота этой волны зависит от свойств материала, из которого изготовлено оптическая волокно, а также от воздействий внешних факторов, таких как температура окружающей среды или механические напряжения объекта, к которому прикреплен световод. Такую оптическую волну называют накачкой. Бриллюэновское усиление возникает, когда оптический сигнал зондирования распространяется навстречу сигналу накачки, при этом ширина линии источника зондирующего излучения и источника накачки должны быть меньше ширины линий бриллюэновского усиления (между 30 и 50 МГц). Максимум

усиления достигается, когда частота зондирующего сигнала f_c совпадает с частотой стоксовой компоненты ($f_H - f_B$) спектра усиления Манделъштама-Бриллюэна. Регистрация рассеянного сигнала на разных частотах позволяет восстановить спектр усиления Манделъштама-Бриллюэна (Brillouin Gain Spectrum – BGS) и определить величину бриллюэновского сдвига (Brillouin Frequency Shift – BFS). Пространственная развёртка BFS обеспечивается импульсным режимом накачки. В этом случае усиление сигнала происходит только в той области оптического волокна, где в это время распространяется импульс накачки. Основные физические принципы функционирования BOTDA- и BOTDR-систем изложены А.В. и В.Н. Листвиными в работе [8]. Упрощенная схема BOTDA-метода показана на рисунке 1.2.

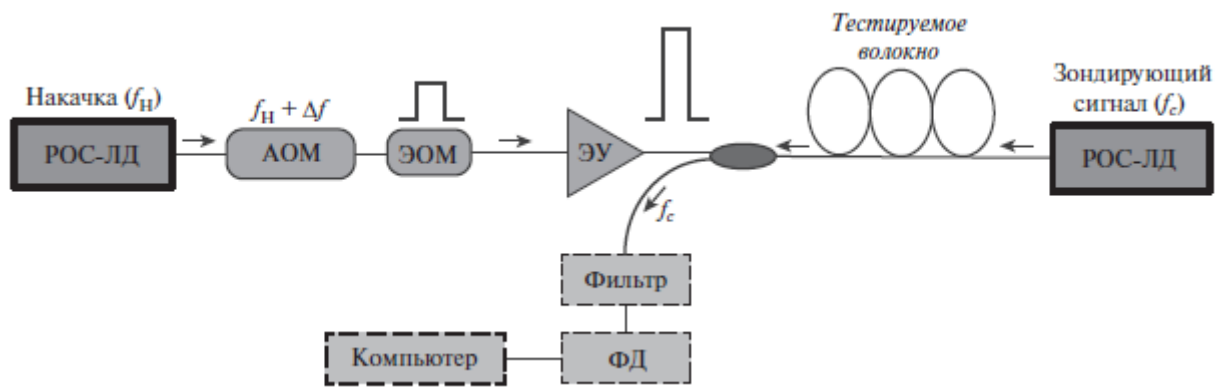


Рисунок 1.2 Схема BOTDA-метода. Адаптировано из работы [8]. РОС-ЛД – лазерный диод с распределенной обратной связью, АОМ – акустооптический модулятор, ЭОМ – электрооптический модулятор, ЭУ – эрбиевый усилитель, ФД – фотодетектор

Как показано на рисунке 1.2, с одной стороны световода вводится накачка частоты f_H , а с противоположной стороны поступает излучение зондирующего лазера с частотой f_c . При прохождении излучения накачки через акустооптический модулятор (АОМ) его частота становится равной $f_H + \Delta f$, где Δf – сдвиг по частоте, заданный АОМ. Затем амплитуда сигнала модулируется при помощи электрооптического модулятора (ЭОМ), после чего подается для усиления в оптический эрбиевый усилитель (ЭУ). Результирующий сигнал поступает в оптическое волокно (сенсор). Важным

фактором работы такого датчика является совпадение состояний поляризации излучения зондирующего сигнала и накачки, поскольку от этого зависит величина коэффициента бриллюэновского усиления. Этот коэффициент максимален, когда состояния поляризации одинаковы в точке взаимодействия этих волн. В стандартных одномодовых телекоммуникационных световодах состояние поляризации может меняться случайным образом, что ведет к замираниям отклика фотодетектора. Для предупреждения возникновения эффектов несовпадения состояний поляризации в таких системах устанавливается контроллер поляризации (фарадеевский вращатель), который изменяет состояние поляризации излучения. Другой метод – линейная поляризация сигналов накачки и зондирования [37, 40]. Идущее навстречу излучению накачки зондирующее излучение усиливается за счет эффекта вынужденного РМБ, затем попадает на фотодетектор при помощи оптического циркулятора или делителя. Для избавления от сигнала рэлеевского рассеяния используется узкополосный оптический фильтр на входе фотодетектора. Для каждой частоты накачки $f_n + \Delta f$ регистрируется бриллюэновская рефлектограмма, при этом смещение Δf задается АОМ с шагом, меньшим ширины полосы РМБ в несколько раз, что позволяет получить трехмерное распределение спектра бриллюэновского усиления по длине сенсорного световода или исследуемого волокна.

Свою популярность также обрели BOTDA-системы, в которых происходит изменение частоты зондирующего излучения, а частота излучения накачки остается постоянной [41]. Вне зависимости от типа реализации системы измерения профилей спектров рассеяния, производится поиск частоты, соответствующей максимуму усиления и последующему определению натяжения или температуры оптического волокна. BOTDA широко используется при производстве оптических волокон, кабелей, катушек волоконно-оптических гироскопов при контроле натяжения

волокон. В свою очередь метод BOTDR чаще применяется для диагностики линий передачи.

Прибор на основе BOTDR был разработан фирмой Ando (Япония) для контроля натяжения оптических волокон. Для его использования достаточно подключения лишь одного конца волоконного кабеля (рисунок 1.3).

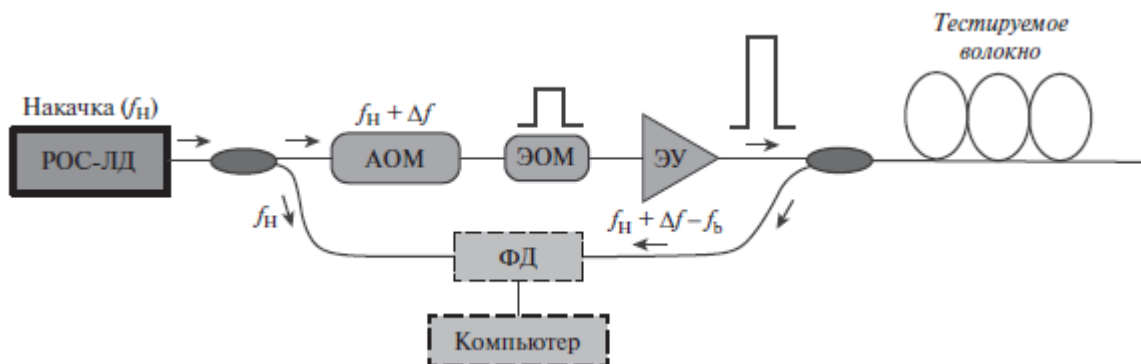


Рисунок 1.3 Упрощенный принцип BOTDR-метода. Адаптировано из работы [8].

Использованы те же обозначения, что и на рисунке 1.2.

Принцип действия BOTDA и BOTDR систем схож, за тем исключением, что генерация спектров рассеяния происходит по принципу спонтанного РМБ.

Стоит отметить, что РМБ является сверхслабым, поэтому, чаще всего, обратно рассеянные спектры сильно зашумлены, как показано на рисунок 1.4, и регистрация их пиков простым определением максимума возможна только с крайне высокой погрешностью. Очевидно, что точность детектирования пика имеет большое значение для будущей точности всей системы. С этой точки зрения высокую актуальность приобрели направления научных исследований, направленных на разработку методов определения положения максимумов спектров рассеяния, а также анализа их точности и быстродействия.

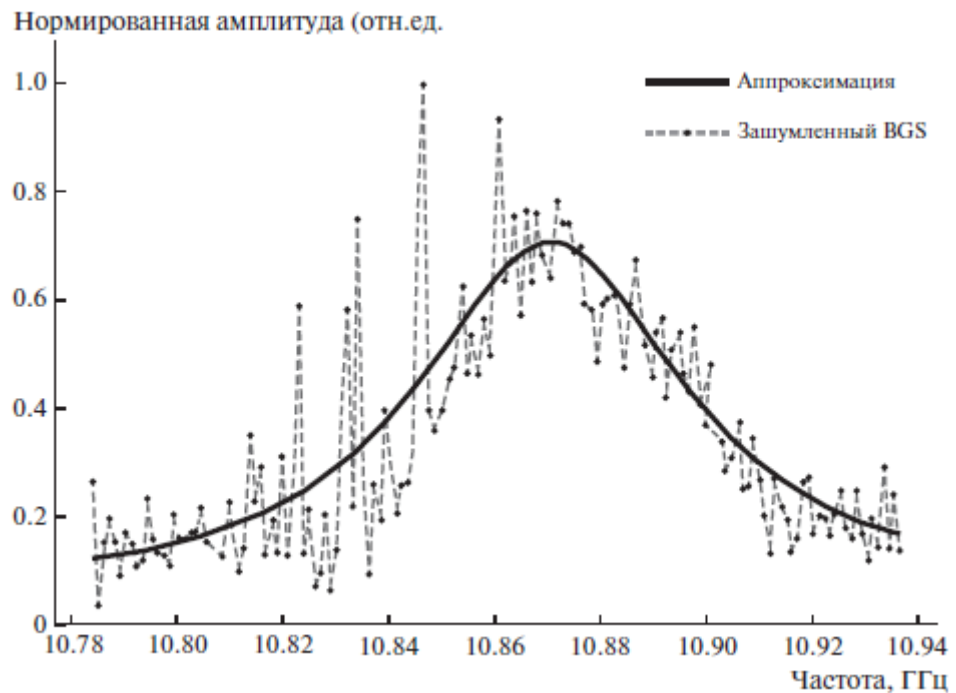


Рисунок 1.4 Идеализированный (полученный аппроксимацией) и реальный (зашумленный) профили BGS [41].

Шумы в BGS описали Javier Urricelqui, Marcelo A. Soto и Luc Thévenaz на “24th International Conference on Optical Fibre Sensors” [42]. Согласно работе, шумы BGS можно разбить на 3 группы.

1. Эффект «двойного рэлеевского рассеяния», вызванный многолучевым распространением излучения в волокне, вследствие множественного рассеяния волны в разных точках оптического волокна приводит. Интерференция этих волн приводит к преобразованию фазового шума сигнала накачки в шум интенсивности зондирующего излучения. Фильтрация таких шумов затруднена, в связи с тем, что шумовые составляющие находятся в той же полосе, что и полезный сигнал. Величина помех из-за двойного рэлеевского рассеяния пропорциональна всей длине оптического волокна, в отличие от других нелинейных эффектов, для которых характерна эффективная длина оптического волокна, что делает этот эффект определяющим в длинных измерительных линиях [42].

2. В стандартных схемах BOTDA сигналы накачки и зондирования взаимодействуют через вынужденное РМБ в каждой точке волокна,

возбуждая локальную акустическую волну на несколько десятков наносекунд. Это время активации обычно намного короче, чем время когерентности лазера (связанное с шириной линии в несколько мегагерц). Вследствие накопления большого числа рефлектограмм от разных импульсов, отличных по спектральным характеристикам, происходит преобразование фазового шума источника в шум интенсивности [42].

3. Оцифровка (дискретизация) оптического сигнала, в редких случаях, может приводить к потере данных. Кроме того, на лабораторных стендах или первых экземплярах серийных систем может теряться еще больше полезной информации: при высоких скоростях сканирования по частоте и одновременной оцифровке может происходить потеря синхронизации передающей и приемной частей, что приводит к утере рефлектограмм, соответствующих тем или иным частотам сканирования. В спектре BGS такой дефект выражается в обращении дискретной функции в нулевое значение на определенной частоте. Потери данных могут происходить при сохранении массивов рефлектограмм. Неправильный подбор параметров оптического излучения и приема данных может приводить к другому виду дефектов, связанных с выходом за пределы динамических диапазонов фотодетекторов и аналого-цифровых преобразователей, что приводит к «срезу» верха лоренцевой функции («клиппинг»). Комбинация нескольких цифровых дефектов, в совокупности с традиционными оптическими шумами приводит к тому, что определить положение максимума BGS становится достаточно сложно.

Различная природа и спектральный состав описанных шумов и дефектов приводит к значительному усложнению определения BFS. В современной литературе представлены способы детектирования BFS без получения полных спектров рассеяния. В работах [43, 44] авторами представлена схема BOTDA с использованием chirпированных импульсов вместо частотного сканирования (Slope-assisted BOTDA), что позволяет сразу

получать пространственную развертку величины, связанной с частотной координатой пика.

Достаточность единичного прохода оптического импульса позволяет пренебречь серьезной цифровой обработкой полученного сигнала, что обеспечивает возможность регистрации быстро меняющихся физических величин. Однако точность такого подхода оказывается куда меньшей, чем при использовании классических подходов.

Таким образом, уйти от получения спектра и его изучения в итоге не удается, а определению BFS просто по максимальному значению мощности в спектре препятствуют шумы фотодетектора и помехи, связанные с различными оптическими явлениями, которые в значительной степени искажают форму сигнала и приводят к погрешности. Как следствие, данный метод практически не применяется в настоящее время ввиду своей неэффективности.

Один из хороших способов регистрации незашумленных спектров РМБ – это использование соответствующей аппаратуры, такой как, к примеру, соответствующие элемента оптической и электрической схем, корректная калибровка мощностей накачки и зондирования, установка длительности импульса в соответствии с типом используемого оптического волокна. Отлично зарекомендовали себя методы, которые уже применяются в классической Рэлеевской рефлектометрии: использование последовательности псевдослучайных импульсов, рефлектометрия частотной области и т.д. Динамические отражатели в оптической линии также способны улучшить эксплуатационные параметры распределенного датчика.

Помимо аппаратных мер для обработки полученных спектров РМБ в дискретном виде можно прибегнуть к обработке сигнала. К направлениям обработки сигнала можно отнести такие направления как: фильтрация

низкий частот, основанная на прямом и обратном фурье- или вейвлет-преобразовании, алгоритмы обработки изображения и др. [45].

Далее будут рассмотрены способы увеличения точности детектирования BFS. Среди них можно выделить такие группы, как: аппаратные методы, корреляционные методы и фильтрация сигнала, методы аппроксимации лоренцевой функцией.

1.3. Аппаратные методы увеличения точности детектирования BFS

Бриллюэновские рефлектометры, в которых подключение оптического волокна осуществляется только с одной стороны, более подвержены эффектам зашумления, нежели анализаторы, вследствие того, что зондирующее излучение также является и излучением накачки. Точность определения BFS в этом случае падает с увеличением дальности оптоволоконной линии.

В современной литературе представлены подходы, позволяющие повысить точность рефлектометрических систем на аппаратном уровне.

В работе [46] авторами предложена схема многоволновой бриллюэновской рефлектометрии (рисунок 1.5). Модулятор Маха–Цендера (ЭОМ на рисунке 1.5) формирует из излучения узкополосного лазера несколько оптических длин волн. Эти длины волн генерируют множественные спектры бриллюэновского усиления, которые регистрируются при помощи когерентного детектирования. В результате обработки спектров нескольких длин волн авторами было достигнуто увеличение отношения сигнал-шум (SNR) системы на 5.1 дБ при длине волоконной линии 50 км, что эквивалентно улучшению в 1.8 раза по сравнению с обычной системой.

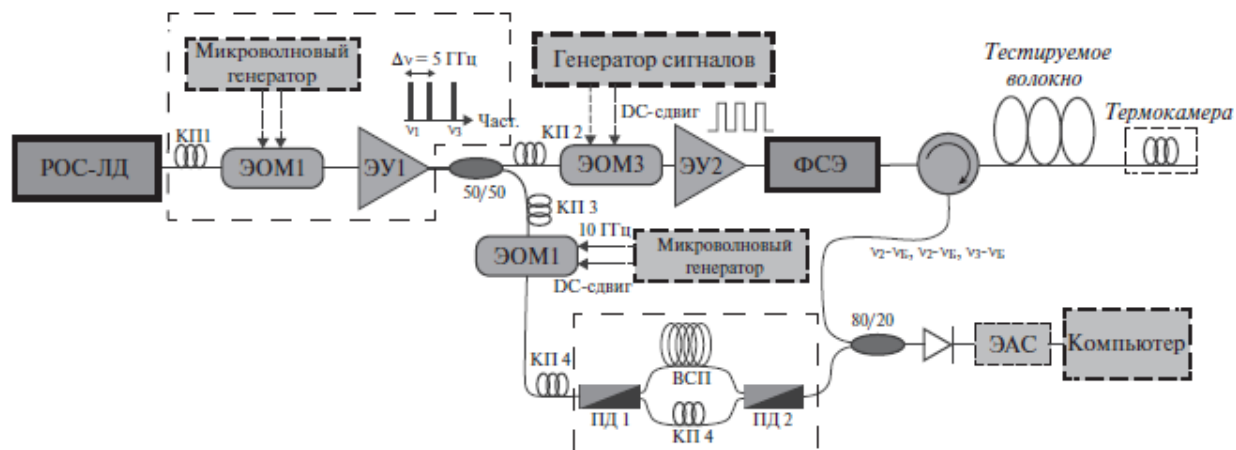


Рисунок 1.5 Схема многоволнового бриллюэновского рефлектометра. Верхняя выделенная штриховой линией область – генератор нескольких длин волн. Нижняя выделенная штриховой линией область – деполаризатор. РОС-ЛД – лазерный диод с распределенной обратной связью, ЭОМ – электрооптический модулятор, ЭУ – эрбиевый усилитель, ФСЭ – фильтр спонтанной эмиссии, ЭАС – электрический анализатор спектра, ПД – поляризационный делитель, КП – контроллер поляризации, ВСП – волокно, сохраняющее поляризацию, DC-сдвиг – смещение постоянного тока.

В работах [47-49] авторы провели моделирование многоволнового подхода, показав возможность использования вплоть до одиннадцати длин волн. Повторив опыт с тремя длинами волн, а также внедрив в опорное плечо системы деполаризующий элемент (нижняя выделенная штриховой линией часть рисунка 1.5), представляющий собой два поляризационных делителя, авторы смогли добиться еще более высоких значений увеличения отношения сигнал-шум системы.

Деполаризующий элемент, представляющий собой интерферометр Маха–Цендера, может использоваться не только для уменьшения шумов [50], вызванных поляризацией излучения. В работах [51, 52] предложена схема модифицированного интерферометра Маха–Цендера с включенной в одно из плеч брэгговской решеткой (рисунок 1.6).

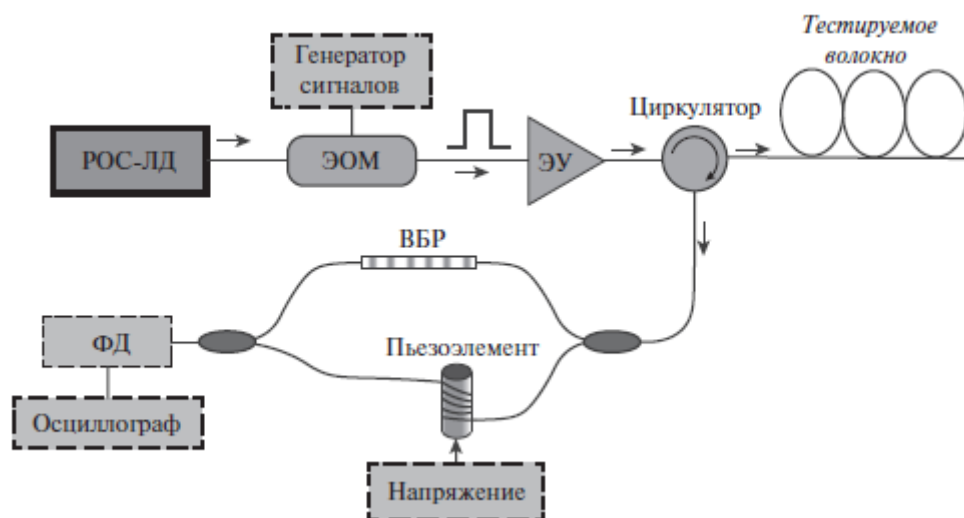


Рисунок 1.6 Схема бриллюэновского рефлектометра с модифицированным интерферометром Маха-Цендера. РОС-ЛД – лазерный диод с распределенной обратной связью, ЭОМ – электрооптический модулятор, ЭУ – эрбиевый усилитель, ВБР – волоконная брэгговская решетка, ФД – фотодетектор.

Фильтрация шумов, связанных с отражением Френеля и рассеянием Рэлея, обеспечиваемая брэгговской решеткой, позволила повысить чувствительность системы на 13 дБ.

Исследование поляризационных компонент излучения и их влияние на точность рефлектометрической системы было отражено в работах [53, 54]. В работе [53] рассмотрен метод уменьшения поляризационного затухания. Как уже было указано ранее, в классическом случае в схеме бриллюэновского рефлектометра используется контроллер поляризации для предотвращения неконтролируемого изменения состояния поляризации излучения в волоконной линии. Тем не менее, такой подход требует постоянного контроля и настройки. Авторы в работе [53] предложили схему пассивного элемента, состоящего из двух поляризационных делителей, соединенных друг с другом (рисунок 1.7); в одно из плеч при этом встроена линия задержки, равная длине импульса. Таким образом зондирующий сигнал разделяется на две поляризационных компоненты, разнесенные во времени.

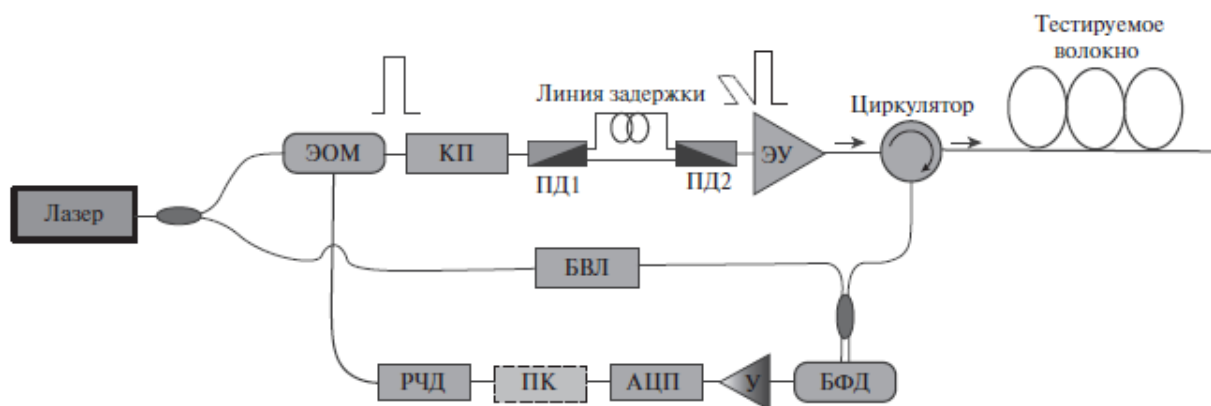


Рисунок 1.7 Схема бриллюэновского рефлектометра с разделением ортогональных поляризационных мод. ЭОМ – электрооптический модулятор, ЭУ – эрбиевый усилитель, КП – контроллер поляризации, ПД – поляризационный делитель, БФД – сбалансированный фотодетектор, У – усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер, РЧД – радиочастотный драйвер.

В результате авторы не только добились упрощения схемы рефлектометрической системы, но и обеспечили улучшение стабильности сигнала при измерении протяженных участков волоконных линий.

Авторы [54] использовали в составе системы модуль дифференциальной групповой задержки для разделения поляризационных компонент сигнала. Отсутствие необходимости использования поляризационного скрамблера позволило уменьшить время измерения системы. Частота измерения волоконной линии протяженностью 930 м составила 650 Гц. Стоит отметить, что представленный подход отличается простотой и невысокой стоимостью, но уступает по точности другим динамическим датчикам с аналогичными параметрами.

В работе [55] реализована схема с применением двойной накачки (рисунок 1.8), реализуемой при помощи модуляции ЭОМ с минимальной передаточной функцией. Две полосы частот, генерируемые ЭОМ, разнесены примерно на удвоенную бриллюэновскую частоту. Эти полосы частот возбуждают два бриллюэновских сигнала, симметрично расположенных по отношению к несущей частоте лазера. Максимальная мощность накачки обеспечивается модулем дифференциальной групповой задержки, плоскость

поляризации которого повернута на 45° . Складывание двух BGS позволило увеличить соотношение сигнал шум на 3 дБ.

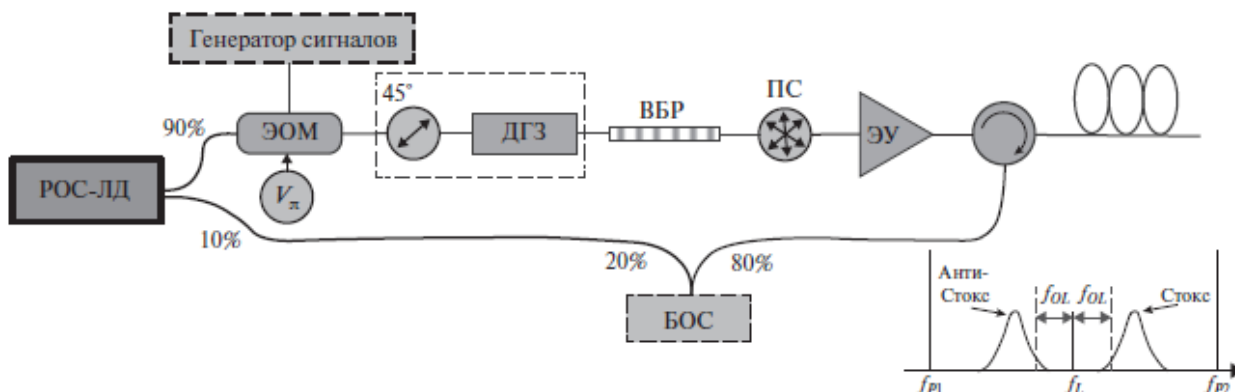


Рисунок 1.8 Схема бриллюэновского рефлектометра с разделением ортогональных поляризационных мод с применением модуля дифференциальной групповой задержки. РОС-ЛД – лазерный диод с распределенной обратной связью, ЭОМ– электрооптический модулятор, ЭУ – эрбиевый усилитель, ВБР – волоконная брэгговская решетка, ЭУ – эрбиевый усилитель, ДГЗ – дифференциальная групповая задержка, БОС – блок обработки сигналов, ПС – поляризационный скремблер.

Помимо этого, отношение сигнал-шум системы может быть повышено путем увеличения коэффициента экстинкции зондирующего импульса. В работе [56] продемонстрировано использование двухкаскадного электрооптического модулятора (рисунок 1.9), который позволил увеличить коэффициент экстинкции импульса с 25 до 50 дБ.

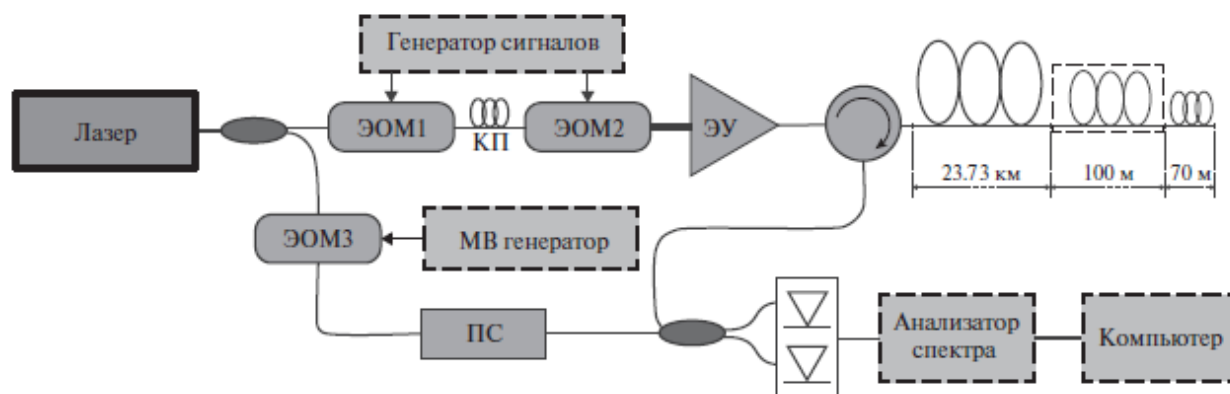


Рисунок 1.9 Схема бриллюэновского рефлектометра с применением двухкаскадного электрооптического модулятора. ЭОМ – электрооптический модулятор, ПС – поляризационный скремблер, ЭУ – эрбиевый усилитель.

Последующее увеличение отношения сигнал-шум составило порядка 8 дБ, а ошибка определения частоты бриллюэновского сдвига уменьшилась с 6.16 до 2.09 МГц. В работе [57, 58] авторы применили синхронный оптический переключатель, позволивший увеличить коэффициент экстинкции с 35 до 60 дБ, а также переключатель усиления в паре с мультиплексором с уплотнением каналов.

Известны работы, в которых исследованию подвергают свойства зондирующего импульса. Так, в работе [59] авторами представлено сравнение различных форм импульсов, используемых при зондировании волоконной линии. Авторами были исследованы импульсы прямоугольной, треугольной и трапециевидной формы, которые формировались при помощи акустооптического модулятора (АОМ) с встроенным модулем управления сигналами (рисунки 1.10).

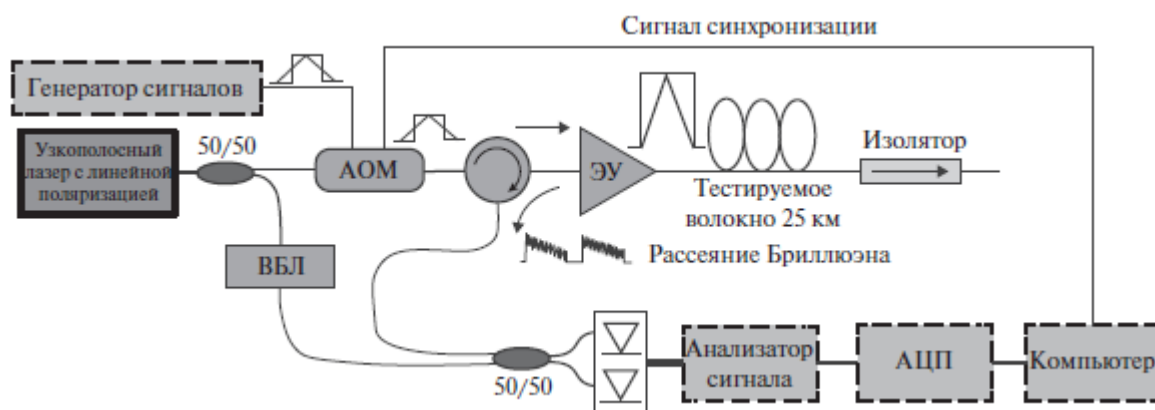


Рисунок 1.10 Схема бриллюэновского рефлектометра с возможностью изменения формы зондирующего импульса. ЭОМ – электрооптический модулятор, ЭУ – эрбиевый усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ВБЛ – волоконный бриллюэновский лазер.

Экспериментально показано, что применение импульсов трапециевидной и треугольной формы позволяет достигнуть увеличения отношения сигнал-шум в 2–3 раза по сравнению со стандартным подходом, когда используется импульс прямоугольной формы.

Фотоприемные устройства, используемые в рефлектометрических системах, играют одну из главных ролей, влияющих на соотношение сигнал-шум, вследствие слабой мощности обратно отраженного бриллюэновского рассеяния. В работе [60] авторы показали возможность использования однофотонных детекторов (single-photon detector). В дальнейшем другими авторами [61] были задействованы однофотонный детектор с повышающим преобразованием и волоконный сканирующий интерферометр Фабри–Перо. Получившаяся таким образом сканирующая система бриллюэновской рефлектометрии смогла достичь точности определения температуры 1.2°C на длине более 9 км для волокна, сохраняющего состояние поляризации.

Наряду с аппаратными методами увеличения точности детектирования BFS важную роль играют методы цифровой обработки и фильтрации сигнала. Накопление данных по частоте и пространству может обеспечить фильтрацию низкочастотных шумов. Это неизбежно приводит к падению быстродействия системы, наряду с пространственным разрешением.

Помимо простого усреднения существуют другие методы повышения соотношения сигнал-шум. Так, например, применяют методики кодирования зондирующего сигнала, вейвлет-фильтрацию [62-66] и фильтрацию Фурье [67]. Эти методы подтвердили свою эффективность в решении множества отдельных задач. Поскольку набор BGS можно представить в виде двухмерной поверхности, используя длину волокна как дополнительную координату, актуальность начали приобретать методы обработки изображений (IP – image processing) для анализа BGS. Для наглядности такую визуализацию используют большинство коммерческих исследовательских и сенсорных систем, однако обрабатывать подобные данные, именно как изображения, стали сравнительно недавно. Далее рассмотрены методы обработки массивов BGS методами IP.

В работе [68] представлен адаптивный алгоритм обработки изображений, основанный на методе ограниченных наименьших квадратов

(CLS – Constrained least squares). Предложенный алгоритм обеспечил самое значимое увеличение отношения сигнал-шум в сравнении с такими методами, как нелинейный алгоритм нелокальных средних (Non-local means – NLM) и вейвлет-шумоподавление (Wavelet denoising – WD) (12.2 дБ), а также сравнительно высокое пространственное разрешение системы (1.41 м). Кроме того, метод оказался более быстродействующим для заданных экспериментальных данных. Быстродействие метода обеспечивается тем фактом, что алгоритм метода ограниченных наименьших квадратов не требует подбора оптимальных параметров, в отличие от своих аналогов.

Еще одно сравнение метода IP с другими методами представлено в работе [69], в которой приведены результаты обработки изображений тремя алгоритмами для подавления шума в спектрах РМБ: NLM, WD, а также «сравнение блоков и 3D-фильтрация» (Block-Matching and 3D-filtering – BM3D). Авторы показали, что все три метода позволяют получить достаточно высокий уровень снижения шума (вплоть до 13 дБ). Кроме того, была также проведена оценка быстродействия каждого алгоритма. Для алгоритмов NLM, WD и BM3D скорость обработки одного и того же набора данных составила соответственно 3.7 мин, 4.8 с и 9.1 мин. Тем не менее, представленный авторами алгоритм BM3D продемонстрировал лучшие показатели пространственного разрешения при одинаковых значениях параметров фиксации данных рефлектометрической системой.

В работе [70] описан алгоритм, основанный на разделении спектральной матрицы на отдельные сегменты, для которых значение BFS существенно отличается. Далее производится сдвиг фрагментов таким образом, чтобы совместить значения BFS участков. После сдвига осуществляется фильтрация сигнала и восстановление исходной матрицы спектров. Таким образом авторам удалось достичь увеличения точности измерений на 13% и пространственного разрешения на 46% по сравнению с IP с применением NLM-фильтрации.

В работе [71] представлено сравнение линейных и нелинейных алгоритмов обработки изображений для анализа BGS. Авторы представили процедуру оптимизации алгоритма NLM, заключающуюся в поиске необходимых параметров. Используя оптимизированный подход, авторы смогли добиться 2 м пространственного разрешения на длине более 100 км при шаге сканирования в 1 МГц (погрешность измерения составила 0.77 МГц с 2000 усреднений).

Описанные выше алгоритмы обработки данных не являются единственным способом увеличения отношения сигнал-шум массивов BGS. Параллельно с развитием 2D-методов получили распространение корреляционные техники обработки сигнала, в большинстве своем пока реализованные только в одномерном пространстве. В следующем разделе рассмотрены корреляционные методы обработки BGS.

1.4. Корреляционные методы обработки BGS

Программные и аппаратные корреляционные методы обработки сигналов с рефлектометров разных типов хорошо зарекомендовали себя как во временной, так и в частотной области [73, 74]. Вычисление автокорреляционной или взаимокорреляционной функции является проверенным способом повышения отношения сигнал-шум данных, в том числе и при математической обработке BGS. В большинстве таких методов исходная функция заменяется на корреляционную, и дальнейшая работа происходит уже именно с ней.

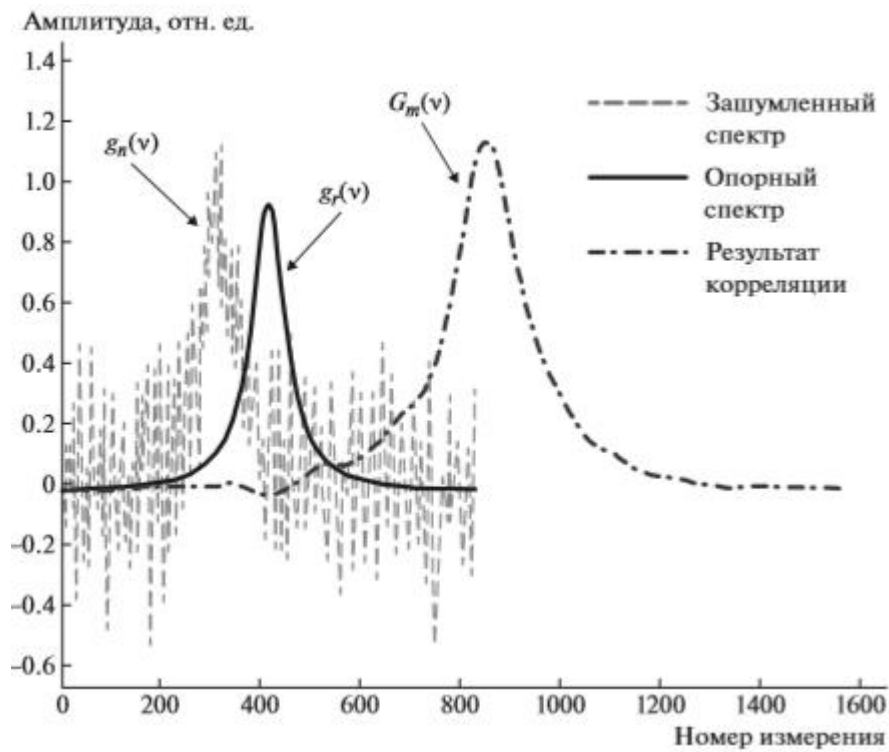
В работах [74] и [75] показано, что точность результатов лоренцевой аппроксимации (Lorentzian curve fitting – LCF) напрямую связана с отношением сигнал-шум и определением параметров подбора алгоритмов аппроксимации кривой [76, 77], и это дает серьезную ошибку нахождения BFS. В работе представлен альтернативный метод, основанный на технике взаимной корреляции полученного спектра и идеальной функции Лоренца. Его преимущества определили следующие два факта: 1) взаимная корреляция

между двумя кривыми Лоренца дает кривую с лоренцевым распределением;

2) взаимная корреляция между идеальной и зашумленной кривыми Лоренца дает кривую, форма которой в основном определяется формой полезного сигнала и в гораздо меньшей степени – шумом. В дальнейшем будем называть этот метод кросс-корреляционным (Cross-correlation method – CCM). Так, взаимно-корреляционная функция между эталонной кривой $g_r(v)$ и кривой Лоренца с шумом $g_n(v)$, состоящей из неизвестной кривой $g_u(v)$ и случайного шума $n(v)$, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} G_{rn}(v) &= g_r(v)g_n(v) = g_r(v)[g_u(v) + n(v)] = \\ &= g_r(v)g_u(v) + g_r(v)n(v) = G_c(v) + N_c(v) \end{aligned} \quad (1)$$

В представленном выше выражении компонента $G_c(v)$ есть сигнал, являющийся результатом взаимной корреляции между двумя идеальными кривыми Лоренца, а член $N_c(v)$ представляет собой порцию сигнала, являющуюся результатом взаимной корреляции между идеальной кривой Лоренца и белым шумом. Соотношение между этими двумя компонентами полученного выражения пропорционально отношению сигнал-шум функции $G_{rn}(v)$. Сравнение отношения сигнал-шум результирующей функции и исходного BGS показало, что исходный спектр является более шумным. Можно также утверждать, что взаимно-корреляционная функция имеет почти идеальное лоренцево распределение вокруг области пика, где шум значительно снижен. На рисунке 1.11 показаны эталонная кривая Лоренца и полученный в эксперименте BGS, а также их взаимно-корреляционная функция. Амплитуда взаимно-корреляционной функции нормирована для наглядности.

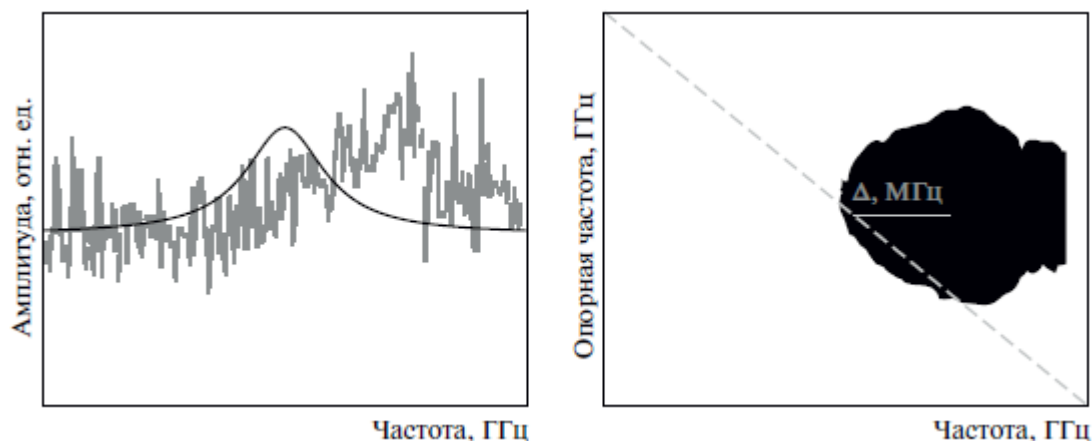


Рисунке 1.11 Принцип работы кросс-корреляционного метода.

Принцип метода, основанного на “анализе зависимостей перекрестных эталонов” (Cross Reference Plot Analysis – CRPA) применительно к экстракции BFS из BGS, представлен в работе [78]. В этом алгоритме также используется взаимная корреляция.

Пусть имеются “опорный” $g_{ref}(f) = (g_{ref}(f_1), g_{ref}(f_2), \dots, g_{ref}(f_N))$ и измеренный $g(f) = (g(f_1), g(f_2), \dots, g(f_N))$ спектры. Возьмем фрагмент опорного спектра $(g_{ref}(f_p), g_{ref}(f_{p+1}), \dots, g_{ref}(f_{p+m-1}))$ и фрагмент измеренного спектра $(g(f_q), g(f_{q+1}), \dots, g(f_{q+m-1}))$, где m – заданное число, $m < N$, а p и q могут принимать любые значения от 1 до $N - m + 1$. Посчитаем свертку выбранных фрагментов: $\sum_{i=0}^{m-1} g_{ref}(f_p + i) * g(f_q + i)$. Если полученное значение превышает некий порог ε , отметим точку $(f_{q+m/2}, f_{p+m/2})$ на плоскости (рисунке 1.12). Значения $f_{q+m/2}$ и $f_{p+m/2}$ соответствуют серединам выбранных фрагментов спектров. Поскольку следует ожидать высокой корреляции между фрагментами, только если они оба находятся вблизи максимумов соответствующих спектров (опорного и измеренного),

центр масс построенной таким образом фигуры дает координаты максимумов опорного и измеренного спектров.



Рисунке 1.12 Принцип работы метода CRPA. Слева – опорный (кривая черного цвета) и измеренный (кривая серого цвета) спектры, справа – построенная фигура, центр масс которой соответствует максимумам спектров [78].

Моделирование и эксперимент, проведенные в работе [78], показали, что CRPA превосходит по точности другие методы.

Помимо методов, увеличивающих точность системы измерения, в литературе уделяется внимание методам, направленным на улучшение быстродействия системы. К таким методам можно отнести, например, увеличение скорости сканирования BGS по частоте, либо понижение его дискретизации таким образом, чтобы искомый профиль BGS можно было восстановить по гораздо меньшему числу точек и корректно найти BFS. В работе [79] показано, что таких точек может быть всего пять. Авторы вводят термин IDBGS (Incomplete discret BGS – неполный дискретный BGS). Корреляционный анализ позволил восстановить сравнительно точные значения BFS, хоть и в некоторой степени близкие к индикаторным. Это было осуществлено с частотой обновления рефлектограмм 600 Гц, что может в некоторой степени быть сопоставлено с характеристиками распределенных акустических датчиков [80, 81]. Результаты численного моделирования показали, что вероятность погрешности по частоте около 0.50 МГц может достигать 49/50 при шаге частотного сканирования 5 МГц и числе склеек

неполного спектра, равном 80. Кроме того, авторы отмечают, что время склейки IDBGS также может оказывать влияние на итоговую точность системы. Ранее проведенная работа по анализу корреляционных алгоритмов для обработки BGS [82], как и рассмотренное исследование доказали возможность применения автокорреляционной функции для восстановления точного значения BFS в BGS, содержащих неполные данные. В дальнейшем подобные методы экстракции BFS из BGS при помощи взаимно-корреляционной функции модифицировались программно для ускорения процесса вычислений [83].

Некоторые корреляционные методы исследования BGS не ограничиваются только обработкой обратно рассеянного сигнала. В некоторых случаях требуется получение сложного зондирующего сигнала, часто это реализуется путем амплитудной модуляции, которая обеспечивает зондирование сенсорного волокна или исследуемой линии псевдослучайными последовательностями. Далее, как и в более простом случае, т.е. корреляционной рефлектометрии Рэля [83-85], пришедший из волокна на фотодетектор сигнал подвергается специальной обработке, предусматривающей построение автокорреляционной функции этого сигнала и сигнала исходного, который уходил в линию. Такой подход дает увеличение отношения сигнал-шум для каждой рефлектограммы, а следовательно, и для каждой частоты BGS. Если цифроаналоговый преобразователь рефлектометра и модулятор имеют достаточную гибкость в вариативности параметров, применение корреляционной рефлектометрии Бриллюэна не требует существенных модификаций аппаратной части системы. Однако специфические особенности применения такого подхода, разумеется, все же существуют. Они будут рассмотрены ниже. К тому же необходимо отметить, что данный метод, называемый также в зависимости от типа системы C-BOTDA или C-BOTDR (Correlation BOTDA или Correlation BOTDR), нельзя путать с рефлектометрией Бриллюэна в

корреляционной области (BOCDA или BOCDR), где используются существенные аппаратные модификации (такие как, например, замена импульсных источников на непрерывные с перестраиваемой длиной волны), что ставит перед собой разные цели: увеличение пространственного разрешения, разделение влияния температур и деформаций и т.д. [86, 87]. Основные преимущества метода прекрасно описали Soto, Le Floch и Thévenaz во введении к своей работе [88]. Итак, специальная модуляция (кодирование) оптических импульсов увеличивает отношение сигнал-шум полученных BOTDA-спектров за счет запуска нескольких последовательностей импульсов в волокно с последующей обработкой данных для получения ответа на один импульс [89-92]. Таким образом, при сохранении пиковой мощности сигнала на уровне случая одиночного импульса общая энергия излучения накачки, подаваемой в сенсор или исследуемое волокно, распределяется во времени и, следовательно, увеличивается на коэффициент, равный количеству импульсов в каждой последовательности. При этом отношение сигнал-шум увеличивается с сохранением пространственного разрешения. Наиболее известные на сегодняшний день эффективные последовательности (коды), применимые для серьезного повышения отношения сигнал-шум (что требуется на больших длинах волокна), используют однополярные (включение/выключение) последовательности импульсов, в которых биты “1” и “0” задаются с использованием стандартной модуляции интенсивности излучения [93]. Другие техники кодирования, отдельные из которых также задействованы в современных радиолокационных системах, используют последовательности биполярных импульсов, в которых необходимо задание элементов “-1” и “1”. Некоторые из этих кодов, например коды Голя с биполярной комплементарной корреляцией (Bipolar Complementary-Correlation Golay Code) [94], обеспечивают более значительное увеличение отношения сигнал-шум, чем любая известная схема кодирования, используемая в бриллюэновской рефлектометрии. Именно поэтому группа

Soto и др. [88] поставила перед собой задачу реализовать новый подход к модуляции сигнала BOTDA, чтобы преодолеть физическое ограничение, налагаемое модуляцией интенсивности при формировании последовательностей однополярных импульсов, а при использовании биполярных последовательностей реализовать эквивалентный эффект от так называемых “положительных” и “отрицательных” импульсов. Метод, однако, потребовал некоторых изменений в аппаратной части: необходимо было ввести специальный модулятор Маха–Зендера для создания двух волн накачки: для “положительных” и “отрицательных” импульсов, эквидистантно отступающих по шкале частот от излучения зондирования (рисунке 1.13).

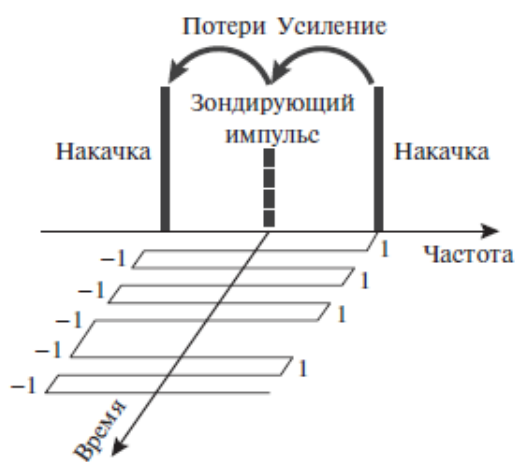


Рисунок 1.13 Применение биполярного кодирования Голея.

Применение биполярных кодов позволило снизить погрешность значений BFS до 0.8 МГц при использовании сенсора длиной 100 км.

В статье [95] представлен метод, как и в вышеупомянутой работе, использующий спектры усиления и потерь, с кодированным фазовым сдвигом Голея для улучшения дальности работы системы и в то же время осуществления измерения с высоким пространственным разрешением. Сигнал накачки, представляющий собой последовательность Голея, поочередно модулируется по частоте с целью генерации стоксовой и антистоксовой компонент РМБ. Численное моделирование показало, что

одновременное использование бриллюэновских коэффициентов усиления и затухания в совокупности с применением метода импульсного кодирования увеличило динамический диапазон чувствительности и улучшило отношение сигнал-шум датчика. Выполнив моделирование более 500 м волокна, авторы также успешно продемонстрировали 10-сантиметровое пространственное разрешение (длительность импульса 1 нс).

Вне зависимости от того, где был применен корреляционный метод (во временной области, как в случае кодов Голея, в области частот, как в случае с BWC, или же вовсе на обеих стадиях обработки сигнала), выходными данными этих процессов по-прежнему являются дискретные BGS. Как показывают уравнения, приведенные в этом разделе, после применения корреляционных методов шумовая компонента существенно снижается, однако, она все же остается в сигнале, при этом полезная составляющая по-прежнему описывается функцией Лоренца. В условиях с экстремально низким отношением сигнал-шум паразитная компонента может быть видна на спектре даже невооруженным глазом. Следовательно, находить координату максимума лоренцевой функции просто по максимальному значению в дискретно заданном спектре по-прежнему не всегда целесообразно. В таких случаях необходимо применение методов аппроксимации лоренцевой функцией, которые будут описаны в следующем разделе настоящего обзора.

1.5. Методы аппроксимации лоренцевой функцией

Методы данного класса можно смело назвать самыми применяемыми в бриллюэновской рефлектометрии. Этот статус они по праву заслужили ввиду своей универсальности при использовании в стандартных метрологических и сенсорных системах, использующих в качестве чувствительного элемента типовое одномодовое телекоммуникационное волокно и режимы зондирования сравнительно длительными импульсами (более 1 м). Все это обеспечивает хорошо прогнозируемую спектральную картину: приемлемые

отношения сигнал-шум (выше 20 дБ) и хорошо различимую компоненту РМБ строго лоренцевой функции. Благодаря этим качествам методы LCF быстро стали неотъемлемой программной частью основных коммерческих систем. К сожалению, коммерческая составляющая успеха данного метода явилась причиной сравнительно невысокого количества публикаций по данной тематике (для сравнения, в несколько раз большее количество работ было найдено авторами обзора по обработке спектров с целью понижения уровня шумов и нахождения BFS при помощи искусственного интеллекта). Однако практический опыт применения BOTDA-систем позволяет заявлять о постепенной эволюции методов в течение последних 15 лет с точки зрения как улучшения производительности, так и повышения точности.

Суть метода, применительно к обработке спектров РМБ была изложена в работе Chengbin Li и Yongqian Li, доложенной на конференции “Wireless Communications, Networking and Mobile Computing” еще в 2009 году [96]. Для получения данных о величине сдвига спектра РМБ строится дополнительная кривая, представляющая собой функцию Лоренца, которая аппроксимирует экспериментальные данные. Для подбора параметров кривой можно воспользоваться известными методами, таким как, к примеру, метод наименьших квадратов, который позволит снизить ошибку до минимального значения. В современных BOTDR- и BOTDA-системах для определения величины сдвига используется алгоритм Левенберга–Марквардта (Levenberg–Marquardt – LM), который является одним из нелинейных методов наименьших квадратов с хорошей сходимостью, пригодной для аппроксимации BGS. Кратко изложим его суть. Функция Лоренца, заданная формулой

$$f(t) = \frac{a_1}{1 + [(t - a_2)/(a_3/2)]^2} \quad (2)$$

полностью описывается тремя параметрами (входящими в вектор x):

$$x = [a_1 a_2 a_3]^T, \quad (3)$$

которые определяют величину, положение в пространстве и ширину функции.

N пар данных $[t_m, y_m]$, полученных в результате измерения BGS и представляющих собой значения частоты в спектре и ее интенсивности соответственно, аппроксимируются нелинейным методом наименьших квадратов. Тогда наименьшая ошибка несоответствия, полученного в эксперименте BGS и аппроксимирующей лоренцевой функции имеет наименьшую сумму квадратов $S(x)$, которая определяется следующим образом:

$$\min S(x) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^N [y_m - f(t_m|x)]^2 \quad (4)$$

Предполагая, что

$$r(x) = [r_1(x), r_2(x), \dots, r_N(x)]^T \quad (5)$$

Выражение (5) можно представить в виде:

$$\min S(x) = \frac{1}{2} r(x)^T r(x), \quad (6)$$

где $r_i(x)$ – нелинейная функция x .

Метод LM используется для оптимального итерационного подбора аппроксимирующей функции, в нем $S(x)$ стремится к минимуму за счет оптимизации параметров вектора x . Этот метод в принципе можно рассматривать как удачную комбинацию алгоритма наискорейшего спуска и алгоритма Гаусса–Ньютона (Gauss–Newton – GN). Метод LM имеет локальную сходимость GN и основные преимущества алгоритма наискорейшего спуска [97]. Для первой итерации параметры вектора x должны быть подобраны максимально близко к необходимым физическим значениям. Вследующих итерациях они будут подвержены оптимизации. Итерационный принцип метода LM задается выражением

$$x_{k+1} = x_k + d_k \quad (7)$$

где d_k – это направление поиска, определяемое как:

$$d_k = [J(x_k)^T J(x_k) + \mu_k I]^{-1} J(x_k)^T r(x_k) \quad (8)$$

Здесь $J(x_k)$ – матрица Якоби от $r(x_k)$ при x_k ; I – единичная матрица; μ_k ($\mu_k > 0$) – так называемый “коэффициент демпфирования”, который может автоматически регулироваться в соответствии с вариацией $S(x)$ на каждом итерационном шаге. Если значение $\min S(x)$ уменьшается незначительно, то μ_k увеличивается, чтобы заставить его двигаться в направлении наискорейшего уменьшения. Если величина $\min S(x)$ близка к локальному наименьшему значению, то μ_k уменьшается так, чтобы последовательность дальнейших действий была близка к шагам алгоритма GN, который имеет быструю сходимость. Когда точность детектирования BFS достигает заданного значения, итеративный перебор останавливается, а последние использованные параметры вектора x могут быть взяты в качестве результата оптимизации. Как уже было отмечено выше, выбор лучшего начального значения параметров вектора x гарантирует, что алгоритм LM имеет быструю скорость сходимости и глобальную сходимость. Если говорить о точности, то метод LCF/LM имеет достаточно много преимуществ. В рассмотренной работе отмечено, что данные, полученные для LCF/LM, взяты из работы [78]. В последней авторы также оценили эффективность LCF/LM, но выбрав для сравнения другие методы (рисунок 1.14).

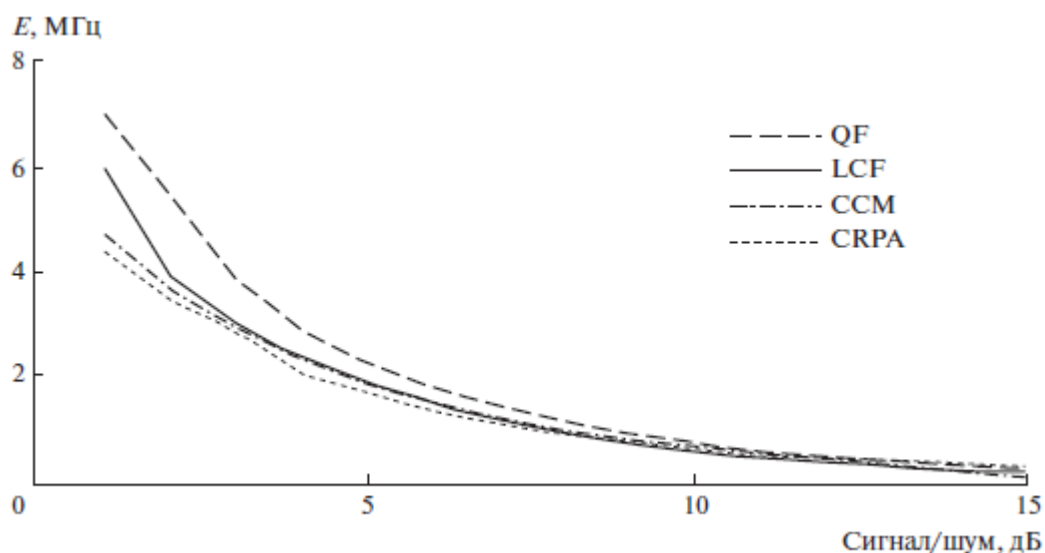


Рисунок 1.14 Абсолютная ошибка LCF/LM и других методов (QF – квадратичная аппроксимация) при разных значениях отношения сигнал-шум, согласно работе [78].

Как бы ни были удобны и точны аппроксимационные и корреляционные методы, во многих случаях они требуют подбора оптимальных параметров и их адаптации под различные условия измерения. Именно поэтому многие исследователи в последние годы поставили перед собой задачу создания гибких методик, основанных на машинном обучении и искусственном интеллекте, предусматривающих итерационное установление оптимальных связей между входными и выходными данными [98, 99]. По мнению многих ученых, в этих методах определения BFS кроется огромный потенциал, который уже в наши дни заметен по современным научным работам.

1.6. Методы искусственного интеллекта в детектировании BGS

В работах [100-103] авторами представлен способ получения информации о температуре оптического волокна при помощи нейронной сети прямого распространения. Нейронной сети прямого распространения представляют собой набор слоев (скрытых и внешних). Каждый слой в свою очередь состоит из набора элементов, называемых нейронами, каждый из которых связан со всеми нейронами следующего и предыдущего слоев (рисунок 1.15).

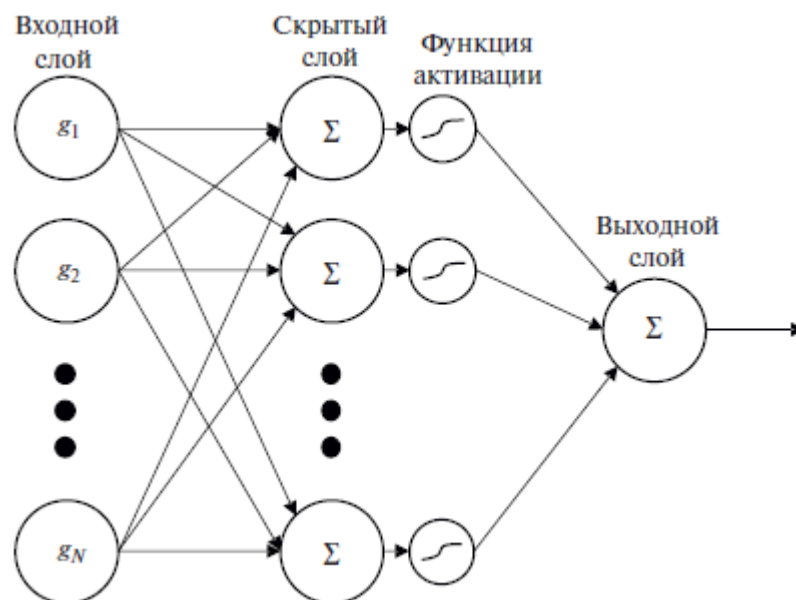


Рисунок 1.15 Схема нейронной сети и нейрона.

Сам нейрон представляет собой сумматор всех входящих в него взвешенных сигналов с нейронов предыдущего слоя, а последующий отклик нейрона формируется через функцию активации нейрона. Обучение таких сетей состоит в подборе весовых коэффициентов связей, которые соединяют между собой пары нейронов. Зачастую для обучения используют метод обратного распространения ошибки.

Авторами представлена нейронная сеть, состоящая из двух скрытых слоев. Для обучения сети на вход сети подавался массив BGS, а на выходной нейрон соответствующее ему значение температуры. После подбора коэффициентов связи авторы смогли добиться точности определения температуры выше, чем для методов LCF и ССМ.

В работе [104] представлено использование нейронной сети прямого распространения. Для обучения сети авторы использовали не классическую функцию Лоренца, которая, как считается, наиболее соответствует форме спектра бриллюэновского рассеяния, а псевдофункцию Фойгта, которая представляет собой комбинацию гауссовой и лоренцевой функций. На рисунке 1.16 представлены для сравнения формы спектров трех исследованных функций.

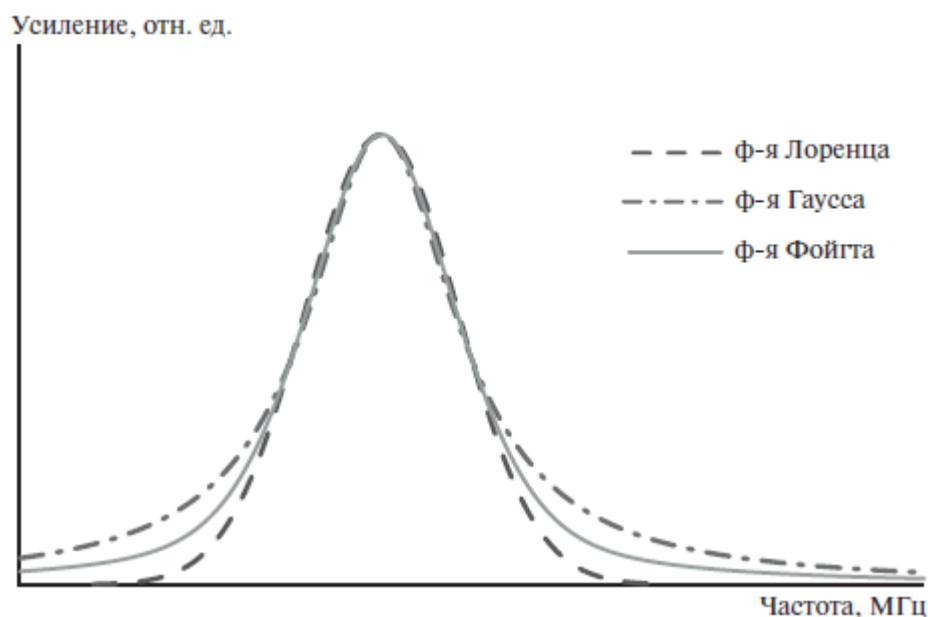


Рисунок 1.16 Спектры функций, подаваемых на вход нейронной сети.

Авторы работы [104] отмечают, что такой подход к обучению нейронной сети обеспечил более высокие показатели точности определения температуры окружающей среды из спектров бриллюэновского рассеяния.

В работах [105-107] авторы использовали нейронную сеть для одновременного измерения температуры и деформации оптического волокна при помощи бриллюэновского анализатора. Разработанная нейронная сеть принимала на вход не только BGS, но и другие параметры, полученные при помощи обработки спектров методом главных компонент. Этот метод позволяет уменьшить размерность данных, сохранив при этом максимум полезной информации. Суть метода заключается в поиске новой координатной оси, для которой дисперсия исходных данных будет максимальна, значения на этой оси будут считаться первой главной компонентой. В случае, если одной компоненты недостаточно для полного описания данных, выбирается второе направление координатной оси, перпендикулярное первому, — вторая главная компонента. Процесс повторяется, пока исходные данные не будут в достаточной степени описаны набором главных компонент. Деформация оптического волокна задавалась при помощи линейной подвижки, на которой было закреплено оптическое

волокно, помещенное в термокамеру. По результатам эксперимента, проведенного авторами, ошибка определения температуры при заданной величине деформации составило менее 6°C.

Помимо классических типов нейронных сетей, в литературе также представлены и другие. Например, в работе [108] рассмотрено применение сверточной нейронной сети для увеличения отношения сигнал-шум полученных BGS. Такие сети часто используются при обработке изображений.

На рисунке 1.17 изображен пример сверточной нейронной сети.

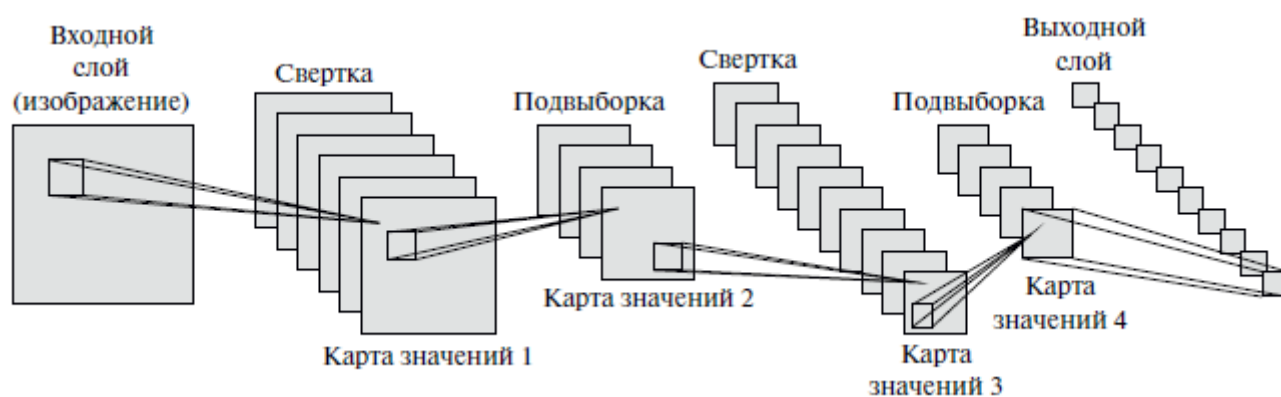


Рисунок 1.17 Пример структуры сверточной нейронной сети.

Суть работы сети состоит в прохождении ядром свертки (матрица весов) по исходному изображению, тем самым формируя множество карт значений, после чего происходит подвыборка для уменьшения размерности данных. Чередую свертку и подвыборку, размерность уменьшают до такой степени, что полученные данные можно подать на стандартный многослойный персептрон. Модель обучалась на смоделированных бриллюэновских спектрах и модельных шумах. Эксперименты показали, что в зависимости от частоты дискретизации получаемых данных возможно увеличение отношения сигнал-шум до 13.6 дБ. Скорость обработки изображения нейронной сетью составила 0.045 с.

Другое направление машинного обучения – метод опорных векторов (Support Vector Machine – SVM), идея которого состоит в том, чтобы разбить все пространство входных данных на подпространства (классы эквивалентности). Рассмотрим работу метода на примере определения температуры окружающей среды при помощи бриллюэновских рефлектометрических систем.

Для обучения системы снимается ряд спектров при температурах T_1, T_2, \dots, T_N (по несколько спектров для каждой температуры). Каждый спектр можно представить в виде вектора из координат P_i – спектральных плотностей мощности на определенных частотах.

Построим эти векторы для температур T_1 и T_2 , другими словами, нанесем точки в гиперпространстве. На рисунке 1.18а точки, соответствующие температуре T_1 , выделены серым, а температуре T_2 – черным. Найдем гиперплоскость, которая поделит гиперпространство таким образом, чтобы черные и серые точки лежали в разных полупространствах, а расстояния до ближайших к плоскости точек (они и называются опорными векторами) были одинаковыми (рисунок 1.18а).

Повторим процедуру для всех возможных пар температур T_i и T_k (всего имеется $N(N - 1)/2$ пар температур), рисунок 1.18б. В итоге все гиперпространство разбито на N частей, каждая из которых соответствует определенной температуре. Обучение завершено. Процесс определения температуры теперь сведен к тому, чтобы найти, в какую из частей гиперпространства попадает измеренный спектр.

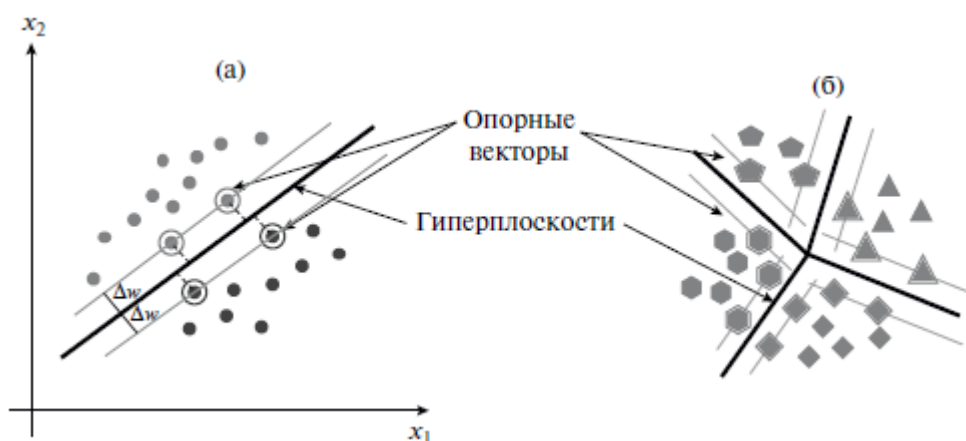


Рисунок 1.18 Пример работы алгоритма SVM для разделения: а – двух классов, б – нескольких классов.

Авторы работ [109, 110] исследовали применимость метода опорных векторов и сравнили его результаты с классическими методами поиска максимума бриллюэновского спектра. Эксперименты показали, что метод опережает классические подходы не только по точности, но и по быстродействию.

Следующий из рассмотренных подходов заключается в применении обобщенной линейной модели (ОЛМ). Идея метода состоит в нахождении функции связи, преобразующей входной вектор из спектральных плотностей мощности в выходные данные (например, температуру или деформацию). На этапе обучения подбираются оптимальные параметры функции связи. На этапе измерения с помощью полученной функции вектор из спектральных плотностей мощности преобразуется в выходные данные. Нахождения самого BFS при этом, очевидно, не требуется.

Так, в работе [111] метод ОЛМ применен для увеличения точности определения температуры окружающей среды при помощи бриллюэновского анализатора (рисунок 1.19). Подбиралась линейная функция связи, при этом использовалась регуляризация Лассо во избежание переобучения модели. (Переобучение может случиться, если при обучении было использовано много “плохих” спектров. Подбор функции связи для наилучшего

соответствия всем спектрам привел бы к неточному определению коэффициентов. Регуляризация позволяет отсечь “плохие” спектры и найти функцию связи более оптимальным образом.)

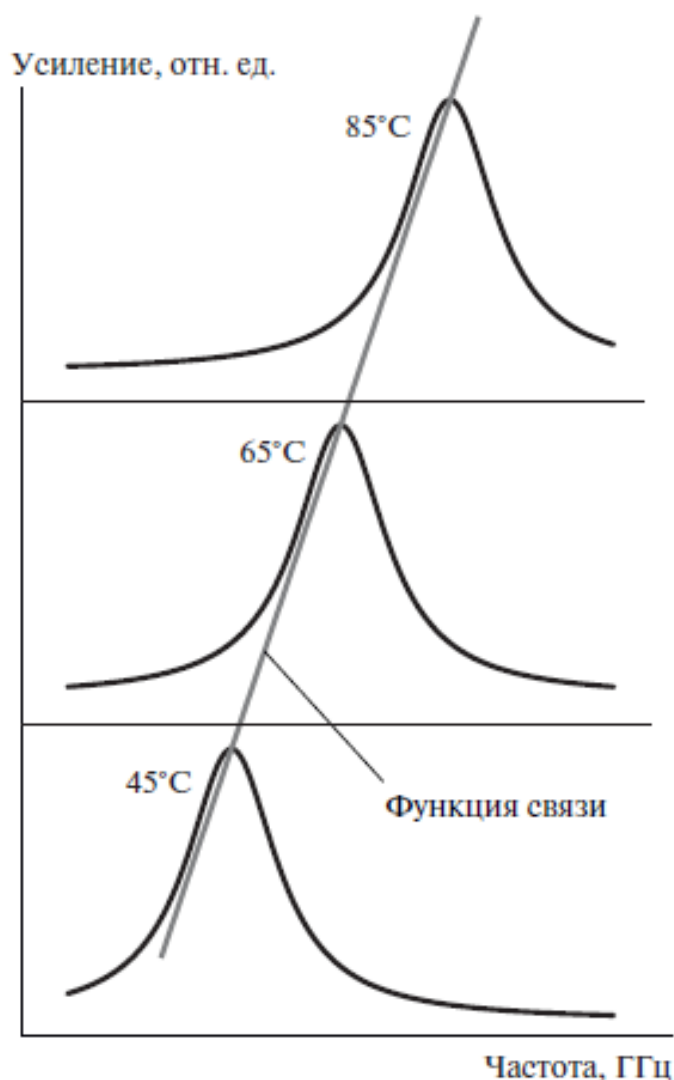


Рисунок 1.19 Принцип работы обобщенной линейной модели.

Авторы работы [111] провели сравнение предложенного алгоритма ОМЛ с традиционно используемой аппроксимацией функцией Лоренца (LCF). Результаты экспериментов показали, что для всех рассмотренных соотношений SNR и шагов сканирования алгоритм ОМЛ дает лучший результат, чем традиционный алгоритм LCF.

Выводы по главе 1

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. Оптическая рефлектометрия, как средство распределенного контроля характеристик ВС, а также параметров внешней среды, является важным инструментом технического контроля качества производимых ВС.

2. Процесс автоматизированного контроля качества СВС на ранних стадиях производства требует реализации модели спектров ВРМБ. Следовательно, требуется реализовать модель РМБ, учитывающую распространение излучения по двум поляризационным осям СВС, а также учитывающую шумовую составляющую спектра и позволяющую оценить ошибку определения максимума, для использования в составе АСИ.

3. Трудоемкость и дороговизна разработки высокоточной системы рефлектометрического контроля требует создания такого алгоритма автоматизированного измерения параметров ОВ, который может быть реализован при помощи типовых аттестованных систем распределенного мониторинга.

4. Показано, что при помощи бриллюэновской рефлектометрии можно оценить не только величину внешних факторов, но и качество СВС. Множество различных техник определения BFS указывает на актуальность данного направления. Несмотря на множество методов улучшения качества определения BFS все они сопряжены с различными сложностями. Таким образом, показана необходимость разработки нового метода, отличающегося

простотой реализации и высокой точностью определения BFS для применения его в АСИ.

5. Проведенный обзор литературных источников показал, что оценка точности новых методов обработки спектров РМБ зачастую проводится на вновь полученных экспериментальных или модельных данных. С этой точки зрения необходимо провести оценку точности разработанного метода в сравнении с известными подходами с использованием единого набора данных для каждого метода.

6. Недостаток литературных данных об автоматизированных системах контроля качества и измерений в процессе производства СВС говорит о том, что проектируемая АСИ и ее элементы должны быть доступны для интеграции в существующие системы измерения, а также быть совместимы для применения совместно с известными методами машинного обучения.

2. Модель погрешности вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в СВС и ее программная реализация

Как было отмечено ранее, качество производимых СВС оказывает существенное влияние на точность распределенных датчиков. Для своевременной отбраковки СВС, не соответствующих строгим требованиям, необходимым для достижения соответствующей точности, необходимо использование методов, позволяющих спрогнозировать будущую точность датчика. Для определения максимально возможной достижимой точности волоконно-оптического распределенного датчика удобно воспользоваться методами компьютерного эксперимента.

Основам моделирования РМБ в оптических волокна посвящено множество работ, наиболее подробно к этому вопросу подошли авторы в работах [112-114]. РМБ представляет собой фотонно-фононное взаимодействие, поскольку поглощение фотона накачки создает Стоксовый фотон и фонон одновременно. Фонон, в свою очередь, представляет собой колебательную моду атомов среды (движущуюся волну плотности), также называемую акустической волной или акустическим фононом. СВС типа «Панда», помимо нескольких оптических мод, могут поддерживать распространение по волокну нескольких акустических мод, в отдельных состояниях поляризации. Далее будут рассматриваться аксиально-симметричные акустические моды, поскольку главная оптическая мода линейно поляризованного излучения LP_{01} будет рассеиваться только аксиально-симметричными акустическими модами в идущую навстречу LP_{01} моду. Динамика РМБ в оптических волокнах может быть рассчитана при помощи следующих выражений [114]:

$$\left(\frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \right) E_p = -\frac{\alpha}{2} E_p + ik_1 \rho E_s, \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \right) E_s = -\frac{\alpha}{2} E_s + ik_1 \rho E_p, \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\Gamma_B}{2} + 2\pi i v_B\right) \rho = ik_2 E_p E_s^* + N, \quad (11)$$

$$\frac{1}{\Gamma_B} = \frac{10^{-6}}{2\pi(17,5 + 0,71\theta_{GeO_2})}. \quad (12)$$

Здесь E_p и E_s – напряженности полей волн накачки и зондирующей (зондирующей) волны; ρ – плотность среды; N – шумовая компонента в конкретный момент времени; v_g – групповая скорость света в световоде; α – коэффициент затухания сигнала; Γ_B – скорость затухания акустической волны, которая равна величине, обратной времени жизни фонона, и связана с шириной акустической линии; k_1 и k_2 – коэффициенты связи между E_p , E_s и ρ ; θ_{GeO_2} – концентрация оксида германия в сердцевине оптического волокна. Шумовой компонентой N , связанной с оптико-акустическими процессами, в данном случае пренебрегают, поскольку она значительно меньше в сравнении с электрическими шумами.

Задав мощности полей волн накачки и зондирования как $P_p = |E_p|^2$ и $P_s = |E_s|^2$, уравнения (9)-(11), с учетом передачи мощности вынужденного РМБ между P_p и P_s при помощи акустической волны и акустооптического эффекта, можно выразить следующим образом:

$$\left(\frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} + \alpha\right) P_p = -g(v) P_p P_s, \quad (13)$$

$$\left(\frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} + \alpha\right) P_s = +g(v) P_p P_s, \quad (14)$$

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:

$$g(v) = \sum_j \left[\frac{g_{B0} v_B \Delta v_B}{A_{ao}^{(j)} v_{ac}^{(j)} \Delta v_{ac}^{(j)}} \cdot \frac{(\Delta v_{ac}^{(j)}/2)^2}{\left[v - (v_0 - v_{ac}^{(j)})\right]^2 + (\Delta v_{ac}^{(j)}/2)^2} \right]. \quad (15)$$

$\Delta v_{ac}^{(j)}$ – ширина линии j -го порядка, обычно принимается равной для всех акустических мод; $v_{ac}^{(j)}$ – эффективная скорость звука; $A_{ao}^{(j)}$ – эффективная площадь акустооптического взаимодействия 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 $G(v, z)$. Во многом, эта величина также определяется величинами оптических мощностей P_p и P_s (см. рисунок 2.1).

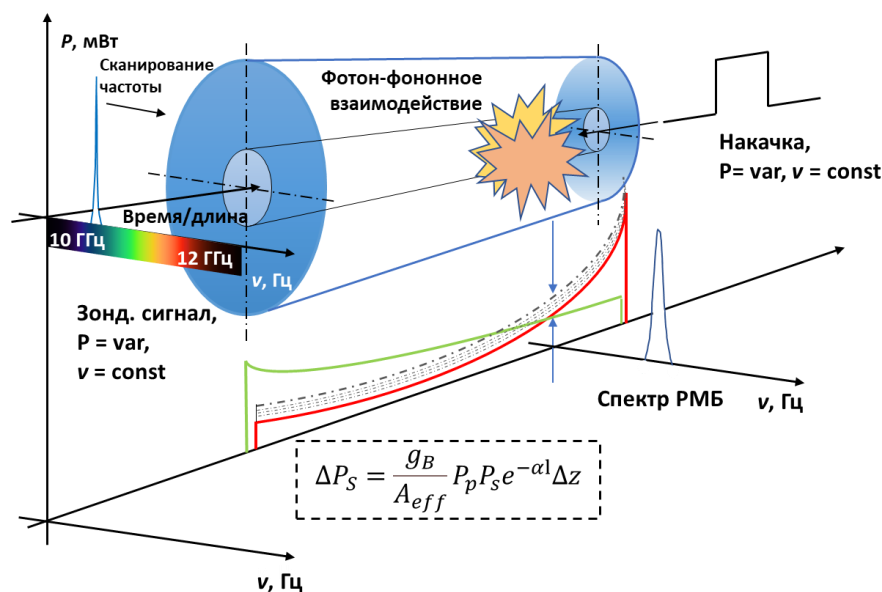


Рисунок 2.1. Распространение волн накачки и зондирования в оптическом волокне [115].

Затем, выражение, представленное на рисунке 2.1, можно использовать для получения оптической мощности в каждой точке световода и на каждой частоте [115]:

$$G(v, z) = \frac{g_B(v)}{A_{ao}^{(j)}} P_p e^{(-\alpha_P z)} \Delta z, \quad (16)$$

где Δz – длина взаимодействия волн накачки и зондирования, на которой $g_B(v)$ полагается неизменной. С учетом шумовой компоненты σ_Σ выражение для отношения сигнал-шум можно записать следующим образом:

$$\sigma_\Sigma = (B\sigma^2 + 2qI_\Gamma B + 2F_N q(\Gamma - 1)I_\Gamma B)^{1/2} \quad (17)$$

$$SNR(v, z) = \frac{G(v, z)I_{\Gamma}}{(B\sigma^2 + 2qI_{\Gamma}B + 2F_Nq(\Gamma - 1)I_{\Gamma}B)^{0,5}} \quad (18)$$

где B – полоса пропускания детектора; σ^2 – спектральная плотность мощности; I_{Γ} – постоянная компонента фототока; F_N – вклад шума оптического усилителя (EDFA); Γ – коэффициент усиления EDFA; q – электрический заряд.

2.1. Анализ шумовых компонент спектров ВРМБ и точности определения сдвига рассеяния

Для получения спектра ВРМБ с заданным отношением сигнал-шум необходимо оценить характер распределения шумов в реальных спектрах ВРМБ.

В работе [116] описан подход для получения распределения шумовых компонент из измеренных на экспериментальной установке спектров ВРМБ. Набор спектров ВРМБ, соответствующих различным точкам по длине однородного, находящегося в известных условиях, одномодового оптического волокна, производился на установке, представленной на рисунке 2.3.

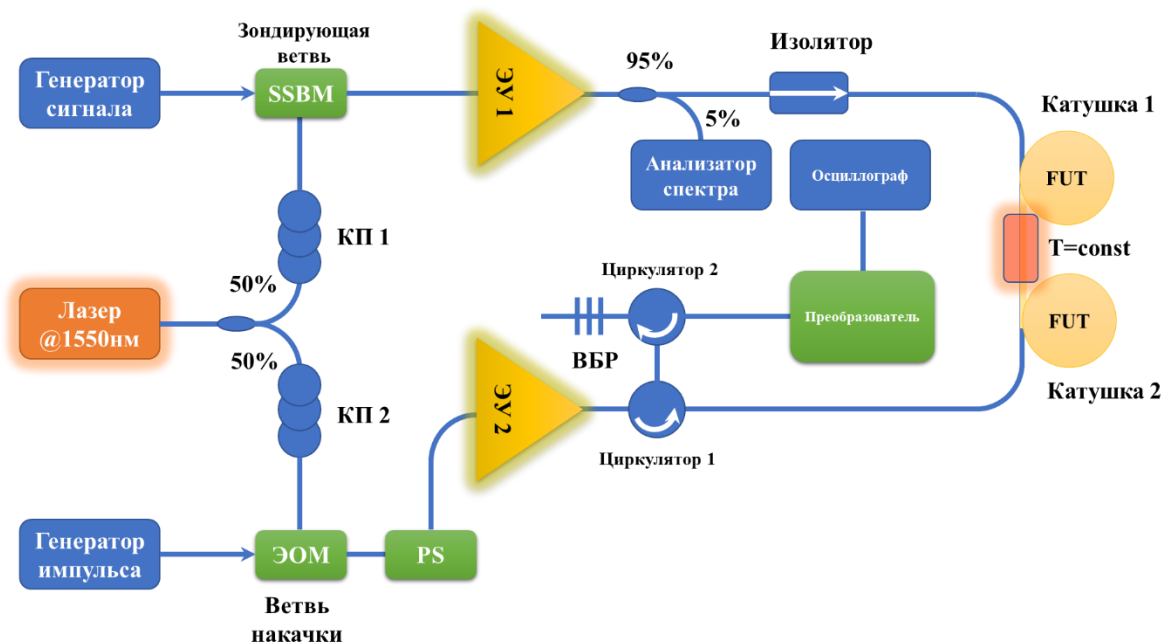


Рисунок 2.3. Экспериментальная установка для получения наборов спектров ВРМБ.

Для зондирования обоих плеч (накачки и зондирования) использовался лазерный источник Yokogawa AQ4312, непрерывно излучающий на длине волны 1550 нм. Для создания излучения зондирования использовался генератор сигналов Hittite HMC-T222, частотный сдвиг обеспечивал однополосный модулятор (single side band modulator – SSBM) iXblue MPX-LN-2. Далее сигнал усиливался до 0 дБм при помощи эрбиевого усилителя ЭУ1 Keopsys CEFA-C-PB-LP. Сканирование по частоте осуществлялось с шагом в 1 МГц. В таком виде излучение поступало в исследуемое волокно (FUT) (Corning SMF28). Что касается сигнала накачки, то он модулировался по интенсивности прямоугольным импульсом при помощи MZM iXblue MX-LN-2. После него в линию был вмонтирован скремблер поляризации General Photonics PCD-104 и еще один усилитель, предназначенный для увеличения мощности сигнала перед введением его через трехплечевой циркулятор в исследуемый образец (FUT), но уже с обратной стороны. Для фильтрации рассеяния Рэля была использована волоконная брэгговская решетка Generic FWHM 1nm, имеющая отражательную способность >95%. Детектирование искомого сигнала осуществлялось с помощью Tektronix P6703B O/E converter. Визуализация и сохранение информации во временной и частотной областях осуществлялась осциллографом Teledyne-LeCroy HDO4054 и анализатором спектра Yokogawa AQ6370. Фрагмент волокна был термостатирован при помощи камеры тепла и холода.

Результирующий набор спектров ВРМБ был сведен в матрицу (19):

$$Z = \begin{pmatrix} I_{1;1} & \cdots & I_{m;1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{1;k} & \cdots & I_{m;k} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где, m — количество дискретно заданных частот в спектре ВРМБ ; k — количество спектров для данной частоты сдвига ВРМБ. Значения матрицы Y вычисляются из матрицы Z следующим образом:

$$Y = \begin{pmatrix} k^{-1} \sum_{i=0}^n N(I_{1;i}) & \dots & k^{-1} \sum_{i=0}^n N(I_{m;i}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k^{-1} \sum_{i=0}^n N(I_{1;i}) & \dots & k^{-1} \sum_{i=0}^n N(I_{m;i}) \end{pmatrix} \quad (20)$$

Таким образом, строки матрицы Y – не что иное, как усредненные спектры ВРМБ для каждого значения сдвига частоты. Тогда результирующее абсолютное значение шумовой компоненты:

$$Z' = Z - Y \quad (21)$$

Столбцы матрицы Z' характеризуют девиации от усредненного спектра ВРМБ, присущие каждой частоте. Если для каждой дискретно заданной частоты m случайным образом выбрать номер элемента в столбце $[0, k]$, то будут соблюдены полученные экспериментально законы распределения интенсивности шумовых составляющих для каждой частоты ВРМБ. В логарифмическом виде, удобном для добавления в спектр, шумовая компонента выглядит следующим образом:

$$Z_{log} = 10^{-0,1Z_{add}}(Z'(I_{1;R[0..k]}) \dots Z'(I_{m;R[0..k]})), \quad (22)$$

где Z_{add} – шумовая добавка, дБ; $R[0..k]$ – случайно заданная величина для столбца, определяющего частоту m . Далее величина σ_{Σ} , рассчитанная в выражении (9), используется для нормировки всей шумовой компоненты.

Статистические характеристики шумов представлены на рисунке ниже. Как видно из рисунков 2.4 и 2.5, 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. Факт нормальности распределения облегчил задачу генерирования случайной компоненты сигнала.

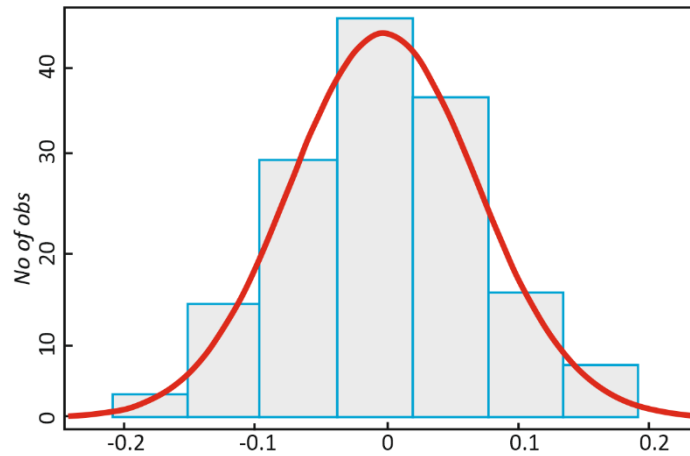


Рисунок 2.4. Распределение случайной величины шумовой компоненты для BGS.

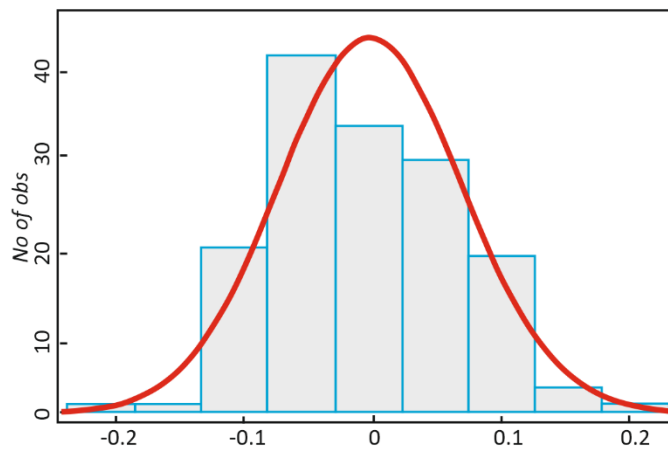


Рисунок 2.5. Распределение случайной величины шумовой компоненты для одной частотной компоненты BGS (во времени).

Далее рассчитывается ошибка детектирования в координате z волокна:

$$\epsilon(z) = \frac{1}{SNR(z)} \sqrt{\frac{(3s \Delta v_{ac})}{16\sqrt{2}(1-\eta)^{3/2}}} \quad (23)$$

где s – шаг сканирования лазера по частоте; η – доля спектральной области пика, берущаяся в обработку при расчете бриллюэновского сдвига частоты (BFS или ν_B). Комбинируя выражения (18) и (23), получим:

$$\epsilon(z) = \frac{1}{G_{v_B}(z)I_\Gamma} \sqrt{\frac{3\delta \Delta v_{ac}(B\sigma^2 + 2qI_\Gamma B + 2F_N q(\Gamma - 1)I_\Gamma B)}{16\sqrt{2}(1-\eta)^{3/2}}} \quad (24)$$

Полученные при моделировании данные о величине шумовой составляющей спектров РМБ будут использованы в АСИ для оценки точности разделения температур и деформаций после проведения калибровки датчика, о которой будет сказано далее

2.2. Определение точности детектирования температур и деформаций при помощи волоконного распределенного датчика

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:

$\begin{pmatrix} \Delta v_x \\ \Delta v_y \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{pmatrix}$, где Δv_x , Δv_y –

изменения частоты ВРМБ для двух поляризационных осей волокна, вызванные термическими ΔT и механическими $\Delta \epsilon$ факторами, то есть разница между сдвигом частоты ВРМБ при воздействии ΔT , $\Delta \epsilon$ и при отсутствии воздействий; 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 оптическое волокно в каждом состоянии поляризации. Для проведения измерения использовался экспериментальный стенд, показанный на рисунке 2.6 [37].

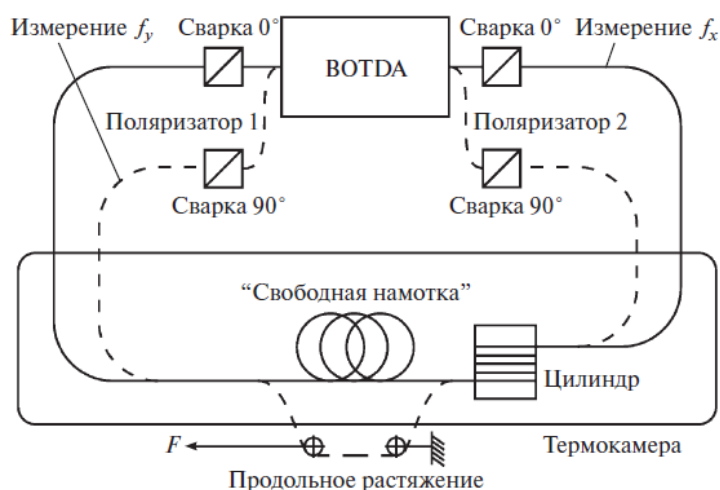


Рисунок 2.6. Исследовательский стенд поляризационно-бриллюэновской рефлектометрии.

ВОТДА – бриллюэновский оптический анализатор временной области.

Для случая с температурными испытаниями зависимость обоих частотных сдвигов ВРМБ от температуры представлена на рисунке 2.7. Механические зависимости выглядят аналогично, имея при этом свои углы наклона.

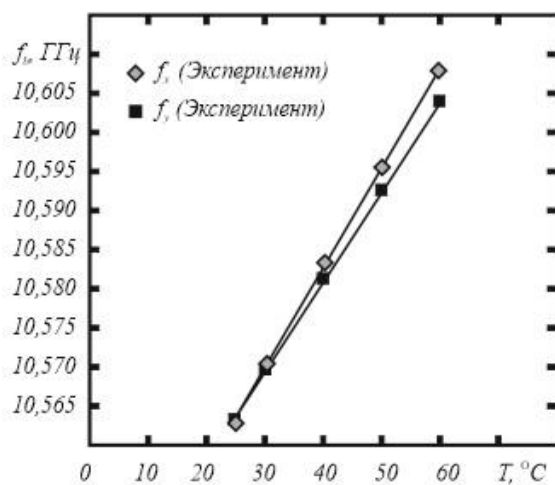


Рисунок 2.7 Зависимость бриллюэновских сдвигов $\Delta\nu_x$ и $\Delta\nu_y$ от температуры, полученная во время калибровочного эксперимента.

Наклоны прямых определяют величину коэффициентов чувствительности. По заданным значениям ΔT и $\Delta \epsilon$ с использованием данных коэффициентов рассчитывались бриллюэновские сдвиги $\Delta\nu_x$ и $\Delta\nu_y$. При обратном пересчете $\Delta\nu_x$ и $\Delta\nu_y$ с использованием тех же коэффициентов матрицы, естественно, получаются исходные ΔT и $\Delta \epsilon$. Стоит отметить, что ошибки при вычислении коэффициентов, вызванные погрешностью

измерений, внесут изменения в полученные значения температурных и деформационных воздействий. На рисунке 2.8 показана зависимость ошибки определения температуры от погрешности ввода коэффициентов матрицы. Зависимость неодинаково чувствительна для разных коэффициентов, но общий вид зависимости одинаков – чем больше погрешность коэффициентов матрицы, тем больше погрешность в определении температуры окружающей среды. Для достижения точности измерений температуры в несколько процентов погрешности коэффициентов не должны превышать долей процента.

Зависимость погрешности определения деформации, не представленная на рисунке 2.8, носит аналогичный характер.

Также исследуется влияние SNR и шага сканирования на качество разделения температуры и деформации (рисунок 2.9). 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.

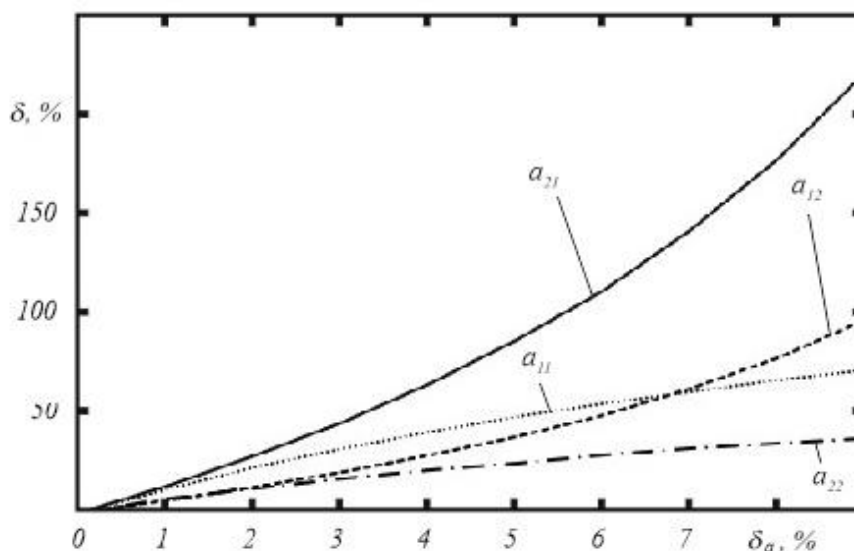


Рисунок 2.8 – Зависимость погрешности расчетного эксперимента от погрешности ввода калибровочных коэффициентов.

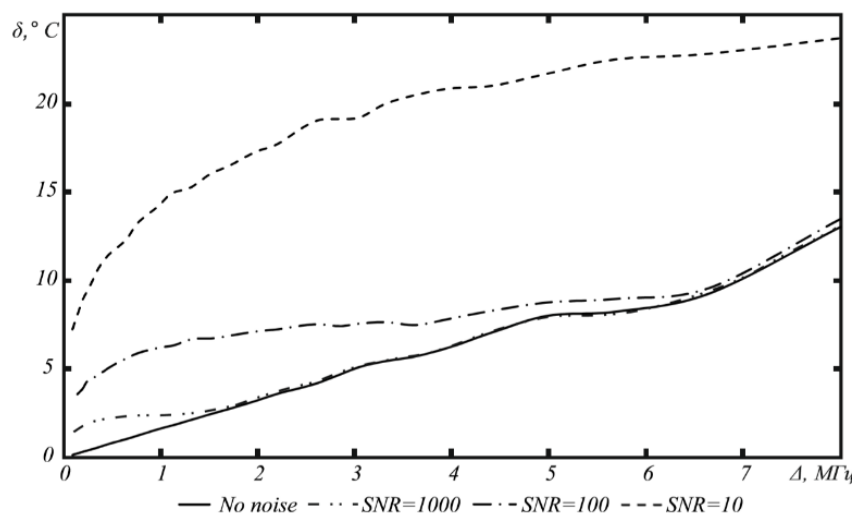
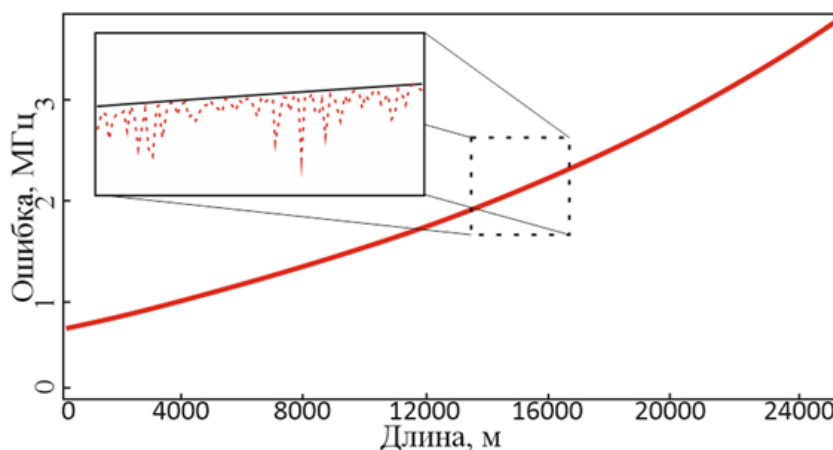


Рисунок 2.9 Полученные моделированием погрешности определения температуры в зависимости от шага сканирования и соотношения сигнал-шум.

Результаты моделирования измерения температуры и деформации при шаге сканирования по частоте 0,5 МГц и SNR 30 дБ представлены на рисунке 2.9. Из рисунка видно, что погрешность определения температуры не превышает 3°C , деформации – $10\mu\text{e}$.

Таким образом, по величинам $\epsilon(z)$ и $SNR(z)$ определяются и фиксируются прогнозируемые точности измерения и разделения физических величин. Выражения (7)-(16) были применены в программной реализации модели и использовались дважды: для быстрой оси поляризации и для медленной. Результат ее работы представлен на рисунках ниже.



Рисунке 2.10 – Ошибка детектирования BFS по длине световода (моделирование).

На рисунке 2.10 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). Как видно из рисунков, зависимости совпадают друг с другом и согласуются с данными, полученными другими исследователями. Коэффициент взаимной корреляции Пирсона для выборок в 25000 точек, представляющих результаты работы классической и созданной модели, равен 0,95, что доказывает адекватность модели. Однако различия всё-таки присутствуют. Это отчётливо заметно на увеличенном фрагменте графика, представленном на рисунке 2.10. Красная кривая более изрезана, при этом выбросы наблюдаются, как и предполагалось ранее, в сторону уменьшения ошибки. Разница ошибок детектирования (для двух стадий) рассчитывается следующим образом:

$$D(z, n, N) = \epsilon(z, n, N) - \epsilon'(z, n, N) \quad (25)$$

$$D(n, N) = L^{-1} \sum_{z=0}^L D(z, n, N) \quad (26)$$

Как показано на рисунке 2.11, девиация D , представленная в выражении (26) увеличивается с уменьшением количества усреднений и разрешения спектра. Её среднее значение достаточно невысокое (ниже 60 кГц – менее $0,1^{\circ}\text{C}$ в пересчете на температуры) и используется для корректировки настроечных коэффициентов в модели.

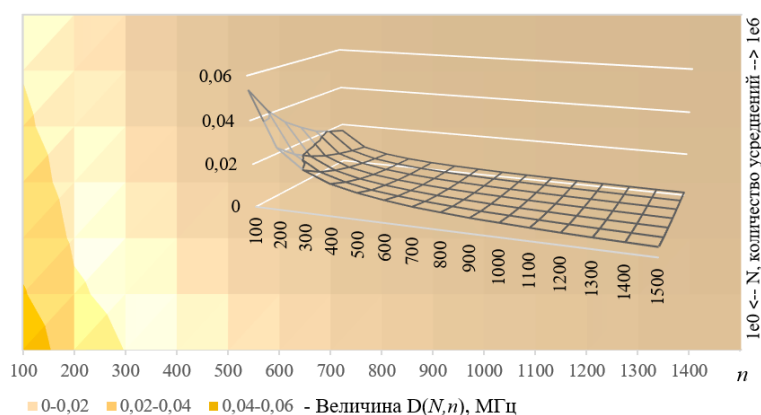


Рисунок 2.11. Разница точностей детектирования частотного сдвига ВРМБ – по данным моделирования и по измеренным спектрам.

Эти результаты хорошо совпадают с данными, полученными другими исследователями [115]. Формулами (18), (23), (24) целесообразно воспользоваться при моделировании ошибки определения BFS в

анизотропных волокнах, при этом рассматривая обе оси световода отдельно, как два разных оптических волокна [117-119]. Полученные по выражению 18 для разных типов и длин оптических волокон значения $SNR(z)$ позволили заключить, что их вариация в специально подготовленных спектрах должна осуществляться в пределах от 2 до 20 дБ. Следовательно, при получении спектров следует опираться на эти значения.

Программная реализация модели была осуществлена при помощи объектно-ориентированных средств программирования. Тестовая версия была реализована в среде программирования Borland Delphi 7 (поскольку до этого ряд значимых процедур и функций был подготовлен в Object Pascal), следующие версии реализованы в Python. Снимок экрана, демонстрирующий интерфейс программного продукта, представлен на рисунке ниже. В левой части окна можно видеть поля для ввода данных, характеризующих оптоэлектронные параметры измерительные системы и характеристики волоконного световода. График справа характеризует фрагмент зависимости ошибки вычисления частотного сдвига от пространственной координаты волоконного световода. Данные могут быть сохранены в формат Microsoft Excel для последующего экспорта в математические пакеты или трёхмерной визуализации (если в ходе компьютерных экспериментов изменялось более одного параметра).

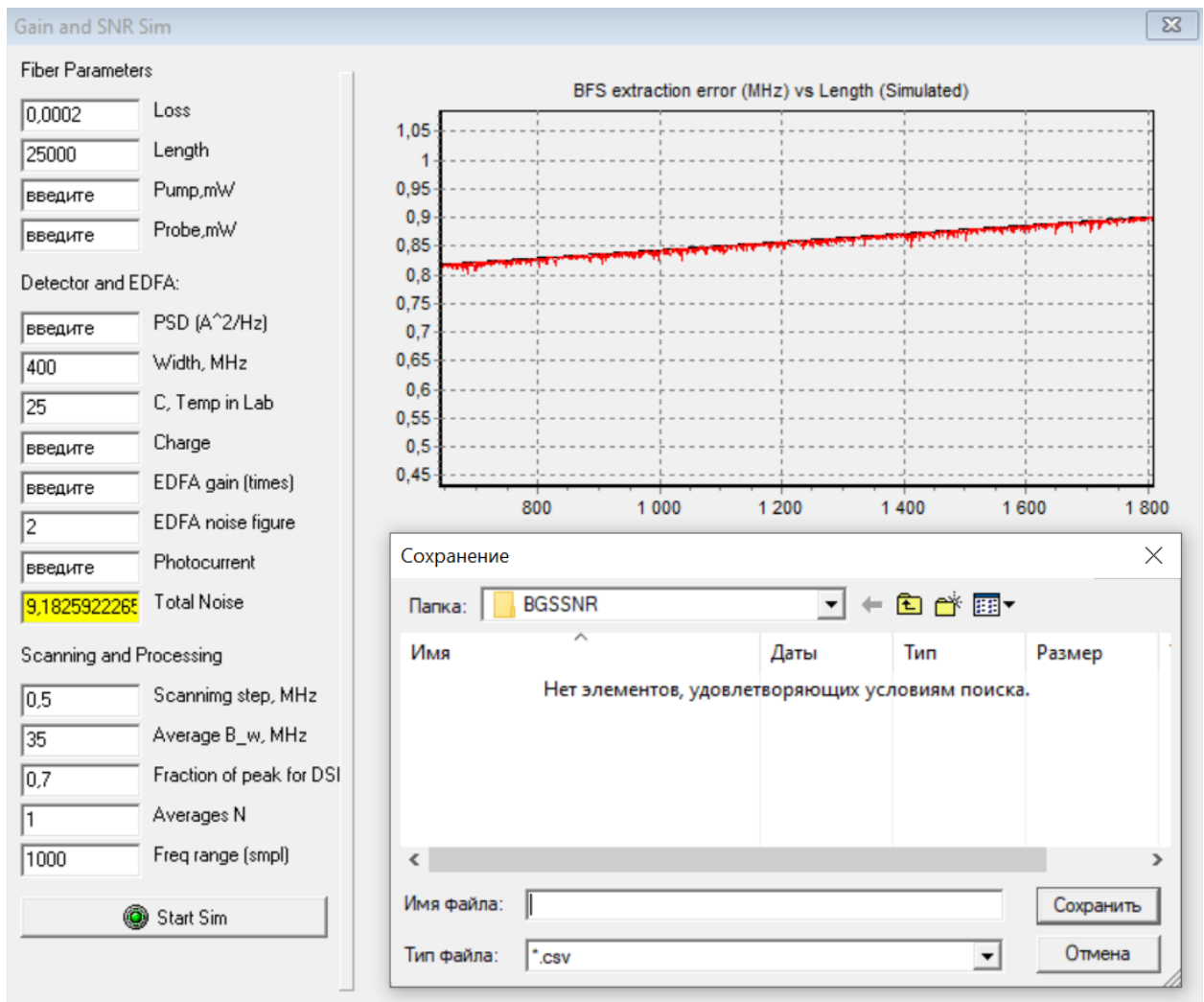


Рисунок 2.12. – Интерфейс программной реализации модели.

Исходя из вышеописанного становится понятна задача создания метода, позволяющего сохранить высокую точность детектирования сдвига спектра ВРМБ в условиях высокой зашумленности спектров. При этом метод должен иметь возможность быть использованным в уже существующих системах бриллюэновской рефлектометрии, а также обладать несложной программной реализацией.

Выводы по главе 2

1. В главе описана математическая модель процесса ВРМБ для анизотропных волоконных световодов.
2. Представлен метод анализа шумовых компонент в спектрах ВРМБ. Показано, что плотность распределения вероятностей шумовых

компонент соответствует нормальному распределению. Что подтверждается критерием Колмогорова-Смирнова. Полученная информация использована для оценки величины ошибки определения сдвига ВРМБ.

3. Представлен метод оценки точности одновременного измерения температур и деформаций в СВС методом бриллюэновского анализа. Метод позволяет оценить влияние погрешности калибровочного эксперимента на точность одновременного измерения распределённых температур и механических напряжений в ВС, скоммутированным с АСИ.

4. Разработана программная реализация модели ВРМБ для СВС, позволяющая оценить точность одновременного измерения распределённых температур и деформаций, используемая в АСИ для оценки качества произведенного СВС.

3. Разработка метода обработки спектров бриллюэновского рассеяния

Ранее было отмечено, что методы определения сдвига ВРМБ, основанные на корреляционных алгоритмах, могут составить серьезную конкуренцию классическому методу определения сдвига ВРМБ, основанному на применении алгоритма аппроксимации функции Лоренца (Lorentzian Curve Fitting - LCF). Однако, в условиях высокого зашумления измеренного сигнала, оба направления испытывают трудности в точном определении сдвига ВРМБ, что приводит к ухудшению точности датчика и неприменимости его в большинстве практических приложений.

Сканирование протяженных волоконно-оптических линий само по себе неизбежно ведет к ухудшению соотношения сигнал-шум получаемой прибором обратного рассеяния информации. Использование в качестве протяженного датчика СВС приведет к еще большей потере мощности оптического излучения, а следовательно – сверхсильному зашумлению получаемого сигнала. Помимо этого, использование недорогих аттестованных систем мониторинга с неклассическими линиями сенсорного оптического волокна может приводить не только к увеличению шумовой составляющей сигнала, но и к частичной его потере [82].

Далее будет рассмотрен новый метод обработки спектров рассеяния ВРМБ, сочетающий в себе простоту реализации, что позволяет использовать его в составе стандартных аттестованных систем распределенного мониторинга, но и сохранение высокой точности в условиях высокого зашумления полезного сигнала, либо отсутствия его части.

3.1. Метод обратной корреляции

Любой, измеренный экспериментально, спектр можно представить как дискретный набор выборок из $2N+1$ пар $[f_0+i*\Delta f, P_i]$, где i – номер выборки в спектре, изменяющийся от 0 до $2N$, f_0 – минимальная частота спектра, Δf – шаг сканирования по частоте, определяемый аппаратной дискретизацией, P_i

– зарегистрированная плотность мощности обратного рассеяния на частоте $f_i = f_0 + i \cdot \Delta f$ (рисунок 3.2а). P_i состоит из двух частей – собственно полезного сигнала и шума, $P_i = P_i^s + P_i^n$. В случае отсутствия шумов ($P_i^n = 0$), простое нахождение максимальной мощности дало бы центральную частоту BGS f_b (BFS) с точностью до ошибки выборки, которая в среднем составляет $\Delta f/4$. Тем не менее, даже наличие небольшого зашумления (< 20 дБ) ограничивает точность определения BFS. При этом погрешность почти не уменьшается с уменьшением Δf .

"Обратный" спектр P' описывается как $P'_i = P_{2N-i}$, а «обратный и смещенный» $P''(k)$ как $P''_i = P'_{i-k}$, учитывая, что $P'' = 0$, если $[i-k]$ находится вне диапазона $[0, 2N]$ (рисунок 3.2b). Здесь k – сдвиг сигнала, который может принимать все виды целочисленных значений от $-2N$ до $2N$.

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

$$X = \sum_{i=0}^{2N} P_i * P''_i = \sum_{i=0}^{2N} P_i^s * P''_i^s + \sum_{i=0}^{2N} P_i^n * P''_i^s + \sum_{i=0}^{2N} P_i^s * P''_i^n + \sum_{i=0}^{2N} P_i^n * P''_i^n \quad (27)$$

В связи с тем, что шумовые и полезные составляющие сигнала не зависимы друг от друга, второе и третье слагаемые можно принять равными нулю. Четвертое слагаемое также может быть приравнено к нулю, поскольку умножение шумов происходит в разных точках. Что касается первого члена, то чем ближе максимумы P^s и P'^s зашумленного спектра друг к другу, тем он больше. По графику зависимости величины X (рисунок 3.2с) можно определить при какой величине сдвига k будет достигнут максимум (в случае его наличия), и, впоследствии, частоту максимума BGS P^s : $f_b = f_0 + (N - k_0/2) \cdot \Delta f$, с точностью до ошибки дискретизации [120, 121].

Для определения того, имеет ли полученная функция четко локализуемый максимум, можно представить выражения корреляционной функции двух функций Лоренца в аналитическом виде:

$$I(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{w^2 \pi^{-2}}{[(f - f_b)^2 + w^2][(f - f_b - \delta)^2 + w^2]} df \quad (28)$$

Для простоты на данном этапе положим отклонение бриллюэновского сдвига $f_b=0$.

$$\begin{aligned} I(f) &= \frac{w^2}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{df}{[f^2 + w^2][(f - \delta)^2 + w^2]} \\ &= \frac{w^2}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{df}{[f^2 + w^2][f^2 - 2f\delta + (\delta^2 + w^2)]} \\ &= \frac{w^2}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{df}{[(f - z_1)(f - z_2)][(f - z_3)(f - z_4)]}, \end{aligned} \quad (29)$$

где $z_1 = -iw$; $z_2 = +iw$; $z_3 = \frac{2\delta - \sqrt{4w^2}}{2} = \delta - iw$; $z_4 = \delta + iw$

Корни z_1 и z_3 лежат в искомой полуплоскости (рисунок 3.1).

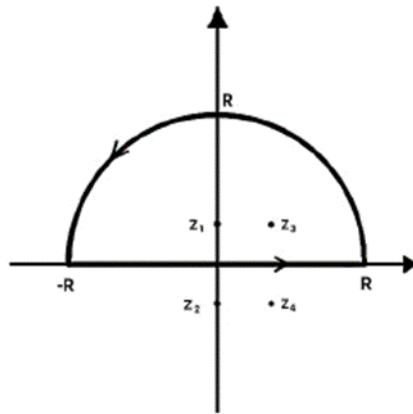


Рисунок 3.1. Иллюстрация процесса интегрирования

Тогда вычеты:

$$Res f|_{r=iw} = \frac{1}{(iw + iw)[(iw - \delta)^2 + w^2]} = \frac{1}{2iw[\delta^2 - 2iw\delta]} \quad (30)$$

$$Res f|_{r=\delta+iw} = \frac{1}{[(\delta + iw)^2 + w^2](\delta + iw - \delta + iw)} = \frac{1}{2iw[\delta^2 + 2iw\delta]} \quad (31)$$

По теореме о вычетах:

$$\begin{aligned}
I &= 2i \frac{w^2}{\pi} \left[\frac{1}{2iw[-2iw\delta + \delta^2]} + \frac{1}{2iw[2iw\delta + \delta^2]} \right] \\
&= \frac{w}{\pi} \left[\frac{2\delta^2}{[2iw\delta - \delta^2][2iw\delta + \delta^2]} \right] = \frac{(2w)}{\pi} \left[\frac{1}{[(2w)^2 + \delta^2]} \right] \quad (32)
\end{aligned}$$

$$I(\delta) = \frac{(2w)}{\pi} \left[\frac{1}{[(2w)^2 + \delta^2]} \right] = \frac{W}{\pi} \left[\frac{1}{[W^2 + \delta^2]} \right], \quad (33)$$

где W – ширина профиля BWC.

Очевидно, что выражение (33) 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).

Следует отметить, что для значения шумовой составляющей P^n , отличной от нуля, второй, третий и четвертый члены (назовем их “паразитными членами”) в выражении (27) не будут точно равны нулю, что, в свою очередь, может к дополнительной погрешности при определении BFS f_b . Однако есть два довода в пользу нового метода. Во-первых, увеличение шумовой составляющей не должно приводить к таким катастрофическим последствиям, как описано в [38], где нахождение максимума сигнала P (FindMax) представленного единичным всплеском шумовой составляющей на определенной частоте не приводит к существенному изменению паразитных членов и, более того, к их сильной зависимости от k . Во-вторых, при уменьшении шага частотного сканирования при сохранении диапазона (т. е. одновременном уменьшении Δf и увеличении N таким образом, что $(2N + 1) * \Delta f = const$), паразитные компоненты должны увеличиваться только пропорционально $N^{0.5}$, как и любая случайная составляющая, в то время как “полезный” первый член увеличивается быстрее, пропорционально N . Таким образом, следует предположить, что, по крайней мере, при низком

отношении сигнал-шум и малом (более детальном) шаге частотного сканирования предлагаемый способ может дать хорошие результаты, как это требуется изначально. Конечно, оба вышеприведенных соображения требуют экспериментальной проверки.

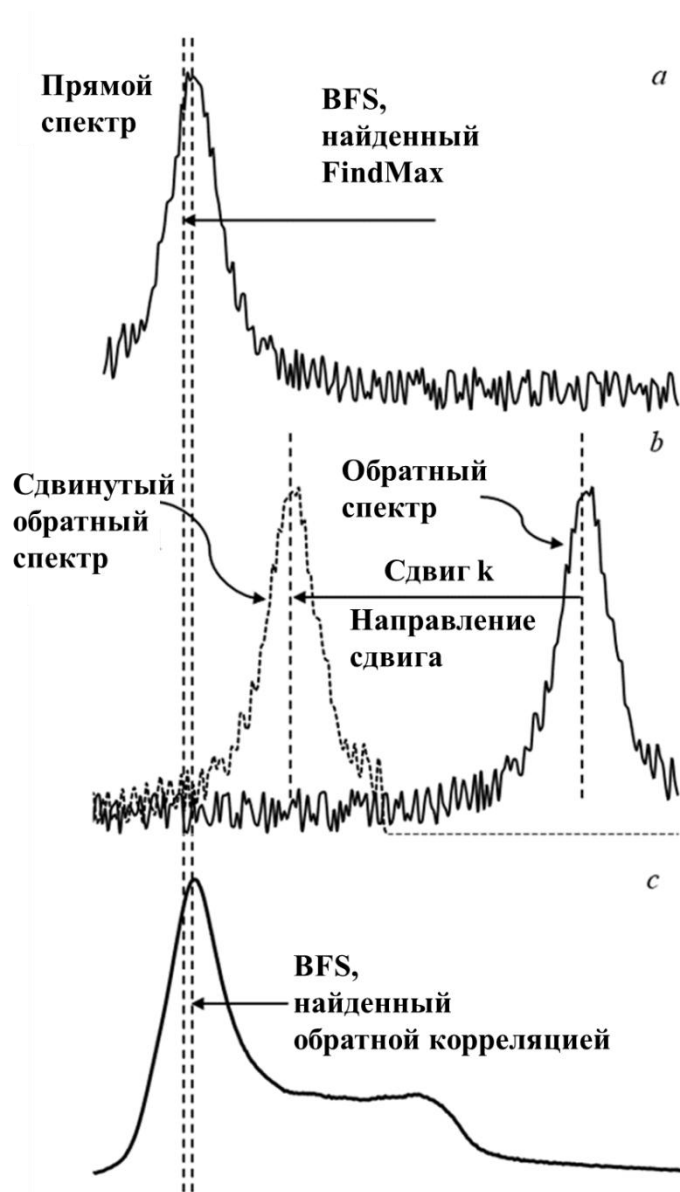


Рисунок 3.2 – принцип работы метода обратной корреляции (a – прямой спектр; b – обратный спектр со смещенной копией; c – обратная корреляционная функция и ее BFS).

Коэффициент кросс-корреляции Пирсона для дискретных функций P и P'' можно описать следующим образом [122]:

$$r = \frac{\langle P * P'' \rangle - \langle P \rangle * \langle P'' \rangle}{\sigma_P * \sigma_{P''}}, \quad (34)$$

где $\langle \rangle$ - среднее значение, σ_p – дисперсия сигнала. Поскольку все значения в этом выражении, за исключением $\langle P^*P' \rangle$, независимы от сдвига k , кросс-корреляция r будет иметь максимальное значение при том же k_0 , что и свертка X – нахождение максимума свертки эквивалентно нахождению максимума кросс-корреляции.

3.2. Первичная оценка точности метода

Для первоначальной оценки эффективности метода была проведена серия численных экспериментов. Был взят диапазон сканирования от 10 400 МГц до 10 800 МГц. В этом диапазоне BFS f_b BGS был выбран случайным образом. Для данного шага сканирования и SNR был сформирован спектр в соответствии с [123]:

$$P_i = \frac{1}{\pi} \left(\frac{w}{(f_i - f_b)^2 + w^2} \right) + P_i^n, \quad (35)$$

где w -ширина бриллюэновского спектра (при моделировании принимается за постоянную величину в 40 МГц), P^n – амплитуда шумовой составляющей. P_i^n был выбран случайным образом равновероятно в диапазоне R:

$$R \in \left[-\frac{1}{\pi w * \text{SNR}}; \frac{1}{\pi w * \text{SNR}} \right]. \quad (36)$$

Для моделируемого спектра максимум был найден традиционным методом (по максимуму P_i – FindMax), а также описанным способом (по “методу обратной корреляции”). Разница между фактическим значением BFS и найденными значениями была единичной погрешностью измерения для каждого из методов. Затем была выбрана новая центральная частота для каждого спектра, и процесс повторился. Всего было сгенерировано более 10 000 спектров. Результаты для шага частотного сканирования 1 МГц приведены на рисунке 3.3. На графике также показаны результаты для Лоренцевой аппроксимации, согласно [124].

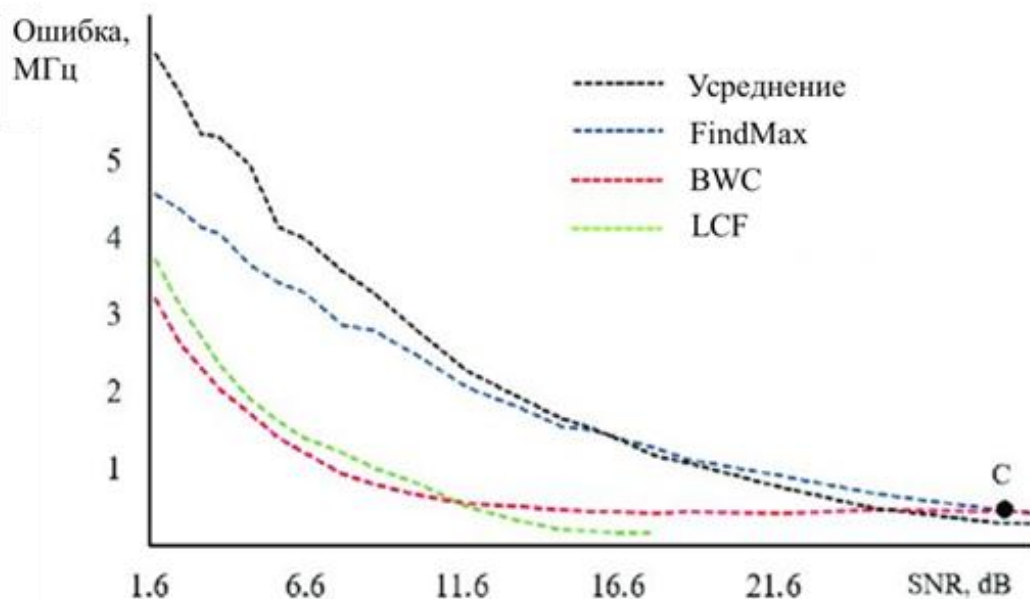


Рисунок 3.3. Сравнение различных методов нахождения максимума BGS для шага частотного сканирования 1 МГц: абсолютная погрешность нахождения частоты (МГц) в зависимости от отношения сигнал-шум исходного спектра, дБ. Данные Лоренцевой аппроксимации взяты из [124].

Из полученной зависимости видно, что сделанное ранее предположение верно – в целом при низких SNR корреляционный метод дает меньшую погрешность в определении BFS. Точку пересечения C кривых, соответствующих методам «FindMax» и «обратной корреляции», на рисунке 3.3 (28.8 дБ) уместно называть “критическим SNR”. Зависимость «критического SNR» от шага частотного сканирования показана на рисунке 3.4. Когда SNR ниже критической точки, метод “обратной корреляции” обеспечивает лучшую точность. Из рисунка 3.4 следует, что чем меньше шаг сканирования, тем больше диапазон SNR, где корреляционный метод дает лучшие результаты.

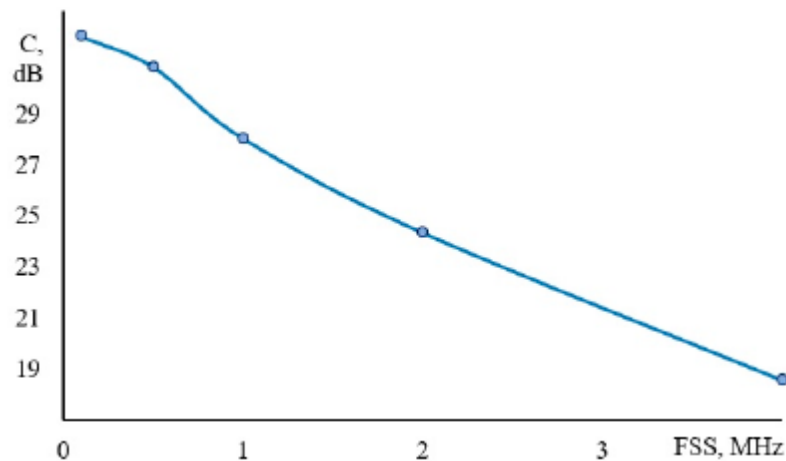


Рисунок 3.4. Критический SNR C , dB от шага сканирования FSS, МГц
(получено в результате моделирования).

Таким образом, оба предположения о рамках применимости нового метода подтверждаются результатами моделирования.

Метод также был протестирован с различными спектральными неоднородностями, полученными в моделировании, включая случаи, которые значительно затрудняют их сравнение с Лоренцевой кривой: высокую асимметрию спектра, а также «фантомные» пики. На первый взгляд, полученные результаты показывают, что погрешность определения BFS существенно не зависит от формы спектра. В дальнейшем это планируется изучить более подробно.

3.3. Сравнение точности методов

Стоит отметить, что предварительная оценка точности, проведенная выше, не дает полной информации о том, на сколько метод «обратной» корреляции отличается по точности от известных методов обработки спектров ВРМБ. Известно множество работ [124, 125, 76], направленных на оценку точности метода определения сдвига ВРМБ, тем не менее большинство из них использует разные наборы данных для тестирования рассматриваемого метода. Для выполнения данной задачи необходимо провести оценку точности каждого метода, применительно к одному набору численных данных, поместив все методы в одинаковые условия.

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

$$P(f) = \left(P_N + \frac{W}{\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{W^2 + f^2}} \right] \right) \left[1 + \frac{(f - \mu) |f - \nu|}{(f - \nu) |f - \mu|} \right] \quad (37)$$

где μ – частотная координата начала цифрового провала сигнала; ν – частотная координата конца цифрового провала сигнала, причем ν всегда больше μ 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.

На рисунке 3.5 представлены примеры сгенерированных спектров. Координата максимума спектра задавалась случайным образом в пределах от 10,55 до 10,65 ГГц.

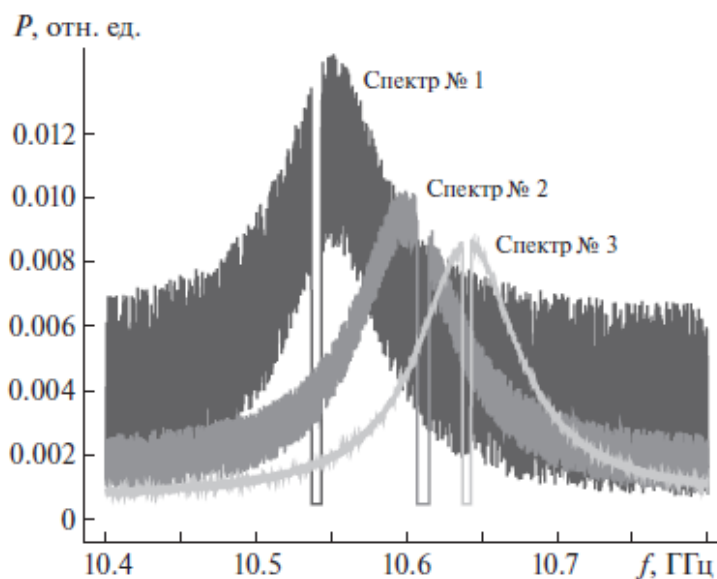


Рисунок 3.5. Сгенерированные бриллюэновские спектры

Дальнейшая математическая обработка осуществлялась тремя методами: метод LCF, детально описанный в [126], широко представлен в литературе и может быть реализован различными алгоритмами; кросс-корреляционный, изученный авторами в [124, 125]. Получаемая с его помощью взаимно-корреляционная функция в непрерывном виде представлена ниже:

$$R_c(f) = \int P(f)L(f - k)df \quad (38)$$

где P – функция, описывающая заданный спектр; L – функция, описывающая идеальный спектр Лоренца; k – значение сдвига спектра.

Реализацию метода обратной корреляции можно представить в виде:

$$R_c(f) = \int P(f)P'(f - k)df \quad (39)$$

где P' – инвертированный по оси частот исходный спектр, сдвинутый на k точек.

Пример результата обработки сгенерированного спектра представлен на рисунке 3.6. Приведены результирующие спектры для взаимной корреляции с идеальной кривой Лоренца (CCM – Cross-Correlation Method), а также для обратной корреляции (BWC – Backward Correlation) и LCF. Ввиду особенностей работы корреляционных алгоритмов максимумы результирующих функций методов BWC и CCM смещены по оси абсцисс вправо.

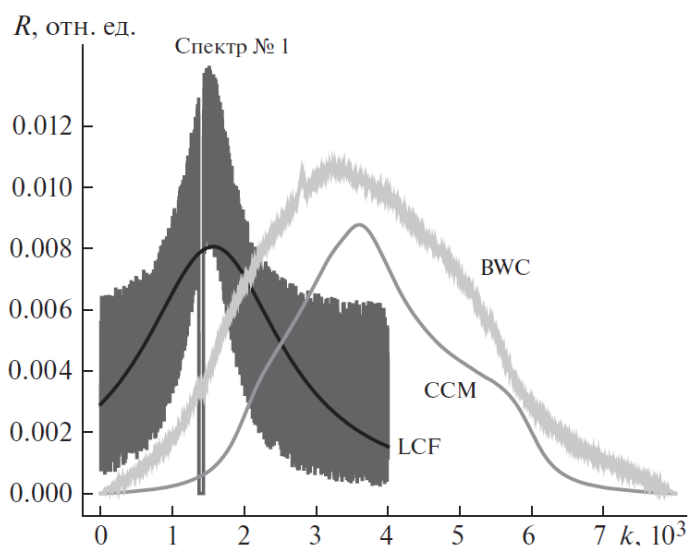


Рисунок 3.6. Результат обработки смоделированного спектра тремя методами. По оси абсцисс – отсчеты.

При работе метода обратной корреляции можно заметить особенность, выражаемую в виде всплеска данных в месте, соответствующем положению дефекта спектра. Это достаточно просто объясняется тем, что при наложении двух провалов друг на друга, общее количество нулевых элементов, участвующих в перемножении и суммировании становится меньше, что вызывает подъем значения функции корреляции.

Данный дефект может обуславливаться не только дефектами оцифровки сигнала, но и сбоями при работе алгоритма сканирования в системе мониторинга. При этом положение и протяженность дефекта могут быть совершенно различными. 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 каждого описанного случая возникновения артефактов в спектре было сгенерировано по одной тысяче спектров.

По результатам обработки спектров тремя методами (LCF, BWC и CCM) были получены графики, представленные на рисунке 3.7.

Разброс данных на графиках обусловлен случайной вариацией SNR сигнала. Тем не менее, большое количество данных позволяет четко определить характерные области, определяющие зоны с низким и высоким SNR. Точность определения положения максимума спектра здесь оценивалась путем определения стандартного отклонения ошибки.

Метод LCF (рисунок 3.7а) показал плавный рост ошибки определения положения максимума спектра при увеличении провала во всех случаях. Кроме того, во всей исследованной области стабильно увеличивается и разность стандартных отклонений при экстремально низких отношениях сигнал-шум и практически незашумленном сигнале. Это говорит о высокой эффективности метода при работе с сигналами с высоким SNR и отсутствием существенных дефектов.

Корреляционные методы, представленные на рисунках 3.7б и 3.7в, как можно заметить, выдают данные, напоминающие форму гистерезиса. Стоит обратить внимание, что, для метода обратной корреляции (рисунок 3.7б), образованный этим гистерезисом объект можно условно разделить на две области: более и менее «плотную».

Более «плотная» область, обозначенная буквой *A*, соответствует измерениям с высокой точностью определения положения максимума спектра. Менее «плотная» область (область *B*) характеризуется, по большей части, одиночными выбросами, которые, при этом, нехарактерны для классического кросс-корреляционного алгоритма. Исходя из этого, можно сделать вывод, что для метода обратной корреляции необходимо использование дополнительных средств, позволяющих отсекаать крупные отклонения в спектре. В этом случае метод окажется более предпочтителен по сравнению с рассмотренными аналогами.

Результаты обработки второго набора данных, представленные на рисунке 3.8, когда провал находится в области искомого максимума, во

многим схожи с ситуацией, уже описанной выше, за исключением некоторых изгибов и локальных выбросов. Для метода обратной корреляции (рисунок 3.8б) были выявлены некоторые особенности, заключающиеся в плавном уменьшении ошибки детектирования максимума спектра, начинающемся с определенной ширины цифрового дефекта. Другая особенность заключается в том, что нижняя область результатов практически «лежит» на оси частот, что говорит о высокой точности получения результатов во всей исследованной области. Это доказывает возможность использования метода обратной корреляции в случаях, когда обрабатываемые спектры практически полностью искажены шумами и дефектами, вплоть до частичной потери информации.

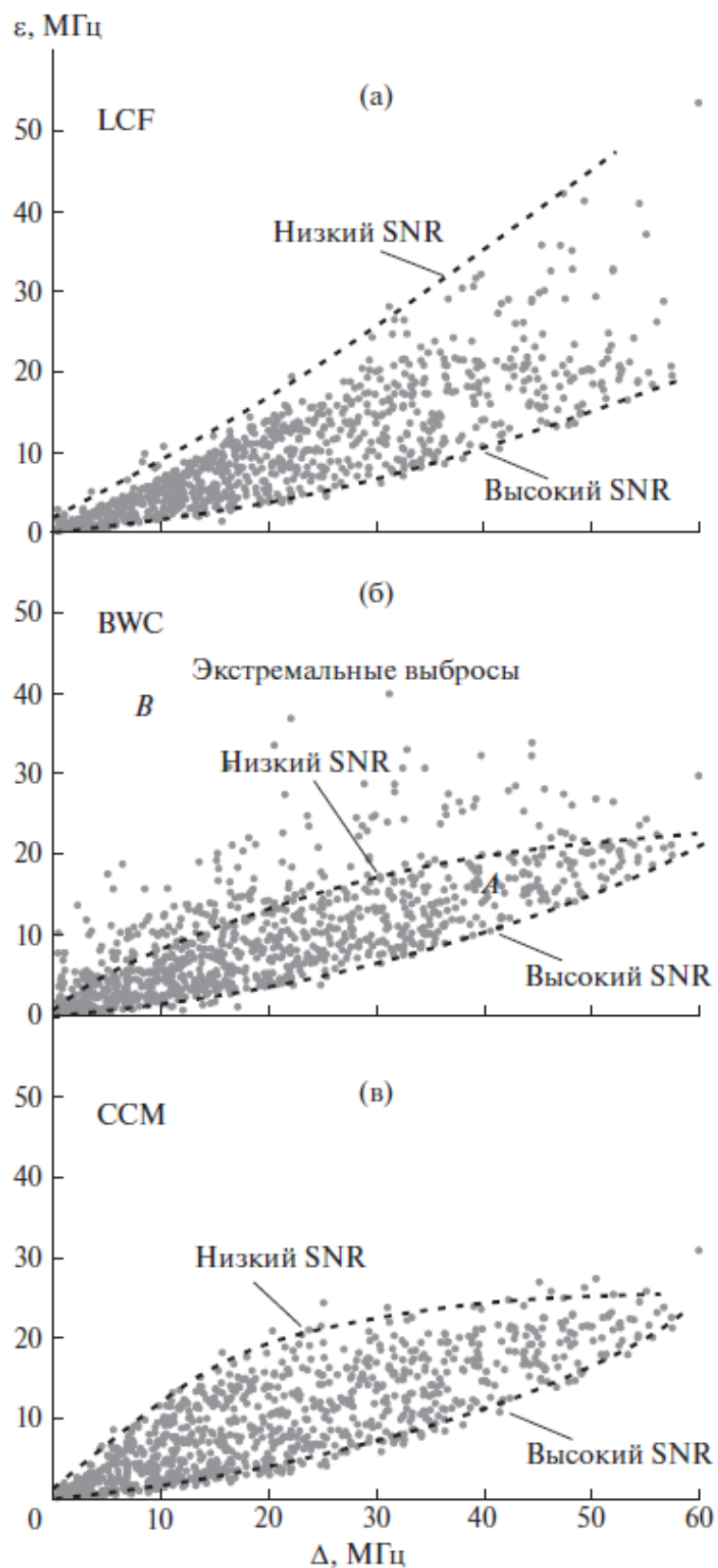


Рисунок 3.7. Распределение ошибок нахождения максимума бриллюэновского спектра для случая № 1.

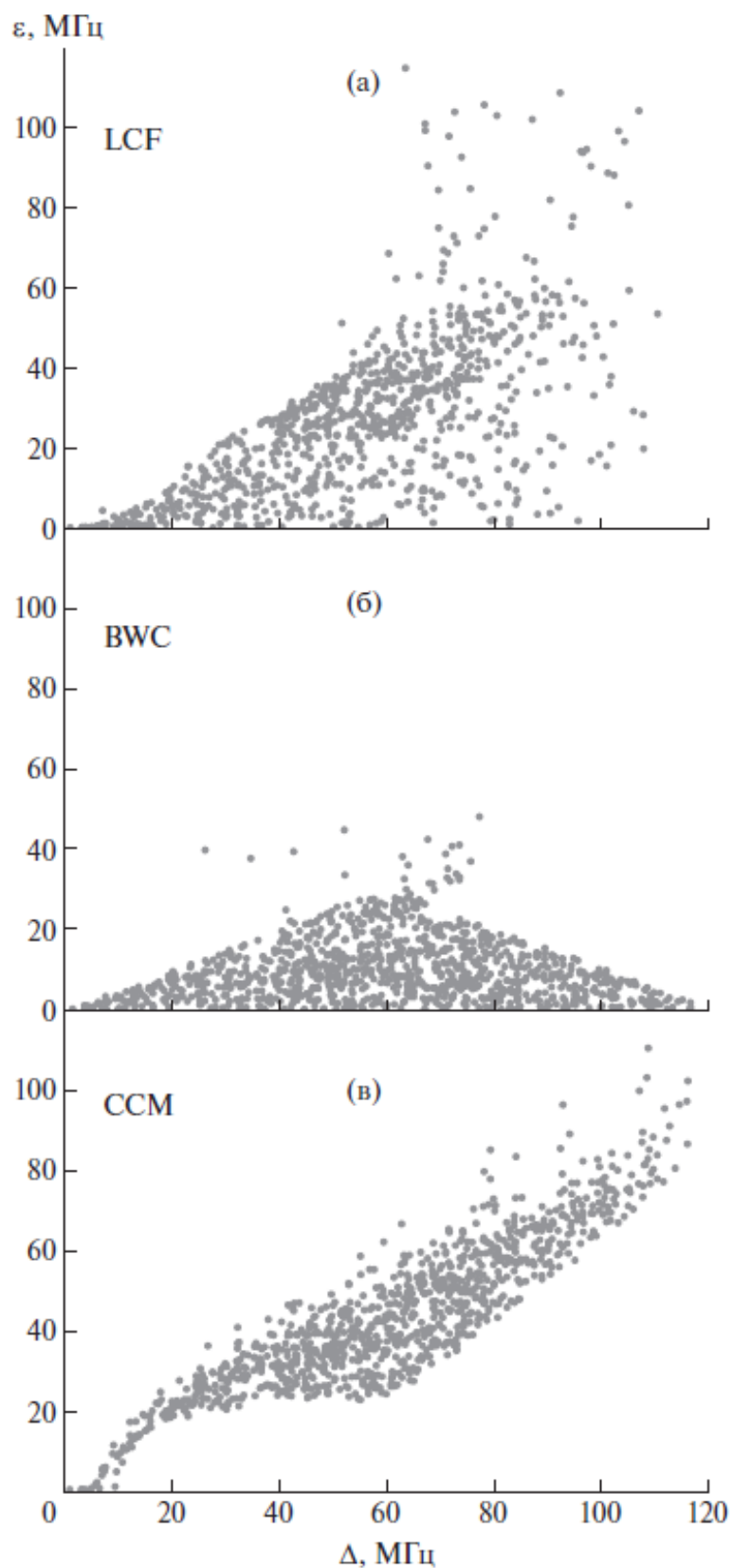


Рисунок 3.8. Распределение ошибок нахождения максимума бриллюэновского спектра для случая № 2.

В таблице 3.1 приведены численные результаты оценки эффективности работы методов обработки спектров ВРМБ при различных SNR. 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).

Таблица 3.1. Эффективность детектирования максимума спектра ВРМБ

Метод	SNR, dB	BFS стандартное отклонение, МГц		
		Без артефакта	Случай 1	Случай 2
LCF	< 5	1.12	10.68	7893.28
	5 – 10	0.24	7.55	4076.74
	> 10	0.04	6.19	316.42
BWC	< 5	2.17	9.12	9.69
	5 – 10	0.74	6.18	7.53
	> 10	0.14	5.83	7.68
CCM	< 5	0.46	7.61	20.39
	5 – 10	0.19	6.54	19.51
	> 10	0.09	6.37	16.13

Отмечено, что алгоритм LCF показал эффективность при высоких SNR в случаях, когда дефект не попадал в область максимума спектра. Во всех остальных случаях более эффективными оказались корреляционные методы. В случаях нахождения дефекта в области максимума спектра самым эффективным становится метод обратной корреляции; меньшую точность демонстрирует известный кросс-корреляционный метод; метод аппроксимации функцией Лоренца полностью теряет актуальность в данных условиях.

Тем не менее, в реальных коммерческих системах мониторинга обнуление данных случается достаточно редко, но может встречаться при экспериментах на макетных установках в исследовательских лабораториях. В связи с этим был рассмотрен случай, когда такой дефект проявляется в спектре с некоторой вероятностью. Прогнозируемое стандартное отклонение E измерения BFS в условиях возникновения артефакта с вероятностью P можно оценить приближенно следующим образом: $E = E_0(1 - P/100) +$

$E_a(P/100)$, где E_0 – стандартное отклонение в условиях отсутствия артефактов; Ea – стандартное отклонение в условиях наличия артефакта.

На рисунке 3.9 представлены результаты расчета точности системы в зависимости от вероятности появления дефекта в спектре.

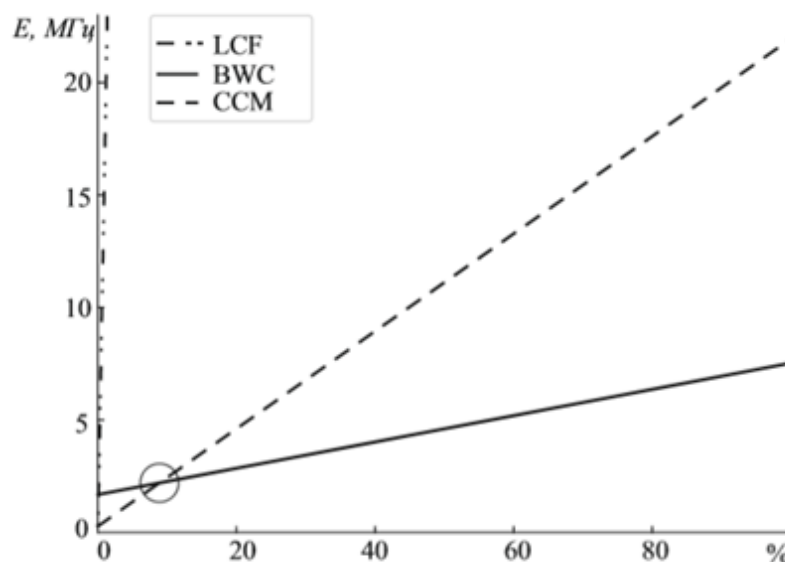


Рисунок 3.9. Стандартное отклонение определения максимума BFS в зависимости от вероятности появления дефекта.

Согласно полученным результатам, начиная с вероятности появления дефекта в спектре 9 % (выделенная кругом область) метод обратной корреляции начинает опережать по точности определения положения максимума спектра свой классический аналог. Стоит отметить, что метод аппроксимации функцией Лоренца сразу теряет свою актуальность при наличии вероятности проявления дефекта.

3.4. Тестирование метода обратной корреляции в рамках взаимодействия с другими подходами детектирования сдвига бриллюэновской частоты

Для тестирования метода обратной корреляции в задаче, требующей детектирования сдвига частоты в волокнах, измеренных с крайне низким отношением сигнал-шум, было произведено исследование поляризационных осей волокна типа панда подходом однократного сканирования, описанным в [127]. Фактически, он заключается в том, что излучение проходит сначала по медленной оси световода, а потом сразу попадает в быструю. Таким образом, на одной рефлектограмме наблюдаются сразу две характерные кривые, соответствующие двум поляризационным осям. Этот метод позволяет разделять влияние температур и деформаций на волоконный световод, исследовать распределение модового двулучепреломления по пространственной координате световода. Однако, он обладает существенным недостатком: ввиду наличия увеличенной в два раза оптической длины с приблизительно одинаковым коэффициентом затухания оптического сигнала, динамический диапазон при таком измерении уменьшается в два раза. Следовательно, внушительный объем полезных данных оказывается погруженным в шумы фотодетектора. Обычно это данные, соответствующие показаниям прибора, зарегистрированным на быстрой оси световода, поскольку в большинстве случаев свет проходит сначала по оси медленной. Для решения этой задачи был использован комбинированный алгоритм, включающий в себя процедуры и функции, реализующие метод обратной корреляции, метод аппроксимации лоренцевой функции и пороговый фильтр. Одним из входных параметров каждой из этих функций являлся весовой коэффициент, определяющий вклад результата функции в искомое значение сдвига частоты. Фактически, данный программный модуль стал пилотной версией разработанной впоследствии концепции автоматизированные системы измерения, затем лишь отличием, что весовые коэффициенты устанавливал сам исследователь. Эксплуатация данного модуля позволила

прийти к пониманию возможного экспериментального итерационного достижения оптимальных результатов подбором весовых коэффициентов. Эти результаты можно видеть на рисунке ниже [128, 129].

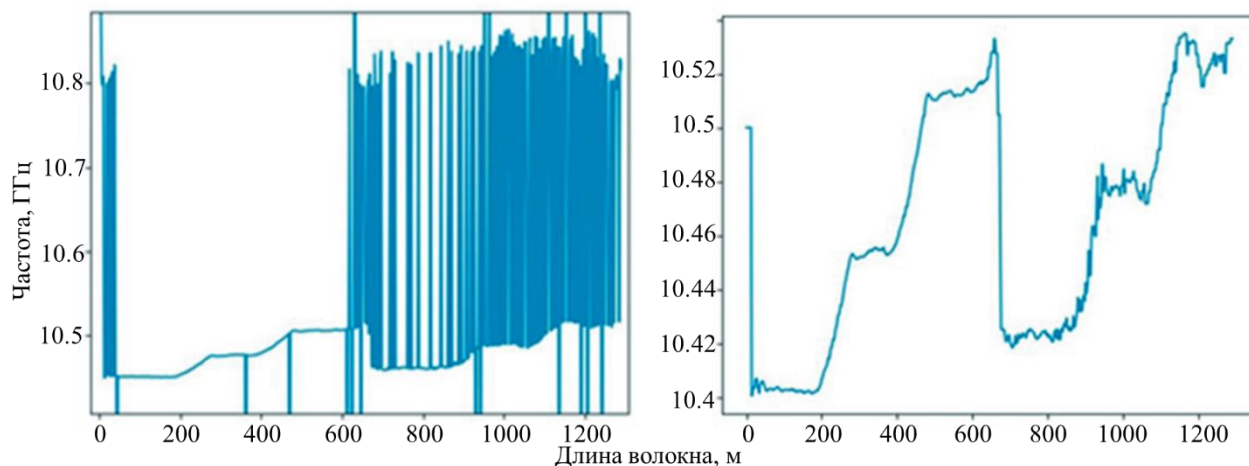


Рисунок 3.10. Результат использования порогового алгоритма

На графике слева (рисунок 3.10) представлены две поляризационные оси, правая из которых имеет достаточно внушительный объем некорректных данных, заметных по резким выпадом частотного сдвига. Это означает, что стандартный алгоритм аппроксимации лоренцевой функцией, встроенный в коммерческую систему анализа, не справился с задачей экстракции сдвига частоты и выдал за верное значение BFS какое-то число из шумовой области. Справа представлены эти же результаты измерений, но после обработки описанным выше программным модулем. Видно, что BFS быстрой оси восстановлен в рамках удовлетворительных погрешностей (как минимум, исходя из критериев не противоречия физическим данным).

Информация о том, как метод был интегрирован в глобальную структуру автоматизированной системы измерений, представлена в главе 4 настоящего диссертационного исследования.

Выводы по главе 3

1. Представлен разработанный автором метод определения положения максимума спектра ВРМБ в оптических волокнах, основанный на обратно-

корреляционном алгоритме, позволяющий сохранить высокую точность определения положения сдвига ВРМБ в условиях высокого зашумления и наличия дефектов, искажающих форму измеренного спектра.

2. Проведено сравнение метода с известными методами в условиях экстремального зашумления и наличия дефектов, с использованием единого набора смоделированных данных. Сравнение показало, что метод обратной корреляции обеспечивает лучшую точность в условиях сверхвысокого зашумления и наличия дефектов в спектре. Показано, что, начиная с 9%-ной вероятности возникновения артефакта в спектре ВРМБ, метод ВВС показывает лучшие результаты по точности определения максимума бриллюэновского спектра в сравнении с известными методами.

3. Показано, что представленный метод обратной корреляции отличается простотой программной реализации, что позволяет встраивать его в существующие цепи обработки данных без существенных потерь. Возможно встраивание метода в структуру автоматизированной системы измерения сдвига РМБ, что позволит повысить точность контроля качества СВС на этапах производства.

4. Автоматизированная система измерения пространственного распределения бриллюэновского сдвига частоты в волоконном световоде

4.1. Общая концепция системы

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 производственных затрат [130-132], как в случае применения экспериментальных установок [133], так и аттестованных коммерческих систем [134]. В случае исследования пространственного распределения сдвига рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в анизотропном оптическом волокне (волоконном световоде) для двух осей поляризации время измерения будет определяться следующим образом:

$$T_{meas} = \frac{L}{F_s c} N n (n_{GeO_2-s} + n_{GeO_2-f}) \quad (40)$$

где L – длина световода, c – скорость света в вакууме, n_{GeO_2} – показатель преломления германатного стекла (f и s – для быстрой и медленной осей соответственно), n – количество точек в спектре, N – количество усреднений, F_s – частота дискретизации модуля аналого-цифрового преобразования бриллюэновского анализатора. При использовании типового аттестованного оборудования удастся варьировать только параметры n и N (в редких случаях – еще и F_s). При их изменении T_{meas} варьируется от минут до часов, при этом ошибка детектирования частоты сдвига (погрешность) на координате z волокна $\epsilon(z)$ будет принимать значения от десятых до десятков МГц [135].

Структура АСИ сдвига ВРМБ представлена следующими модулями:

1. Подсистема, предназначенная для прогнозирования ошибки определения сдвига ВРМБ на основе данных, полученных в ходе проведения первичных измерений СВС (показатель преломления сердцевины,

двулучепреломление на торцах). В случае, если величина ошибки не превышает порогового значения, ОВ передается на следующий этап техпроцесса.

2. Подсистема экспериментального исследования сдвига ВРМБ в СВС с использованием бриллюэновского анализатора.

По завершению измерения системой рассчитывается погрешность измерения сдвига ВРМБ и выбор оптимального алгоритма обработки спектров ВРМБ. В случае грубой невязки результатов предварительного моделирования погрешности в модель вносится соответствующая корректировка.

3. Подсистема определения сдвига ВРМБ с использованием алгоритмов машинного обучения предназначена для точного детектирования сдвига ВРМБ в случаях, когда требуемая точность не может быть достигнута при помощи классических подходов к обработке спектра.

Схема работы АСИ измерения сдвига ВРМБ представлена на рисунке 4.1.

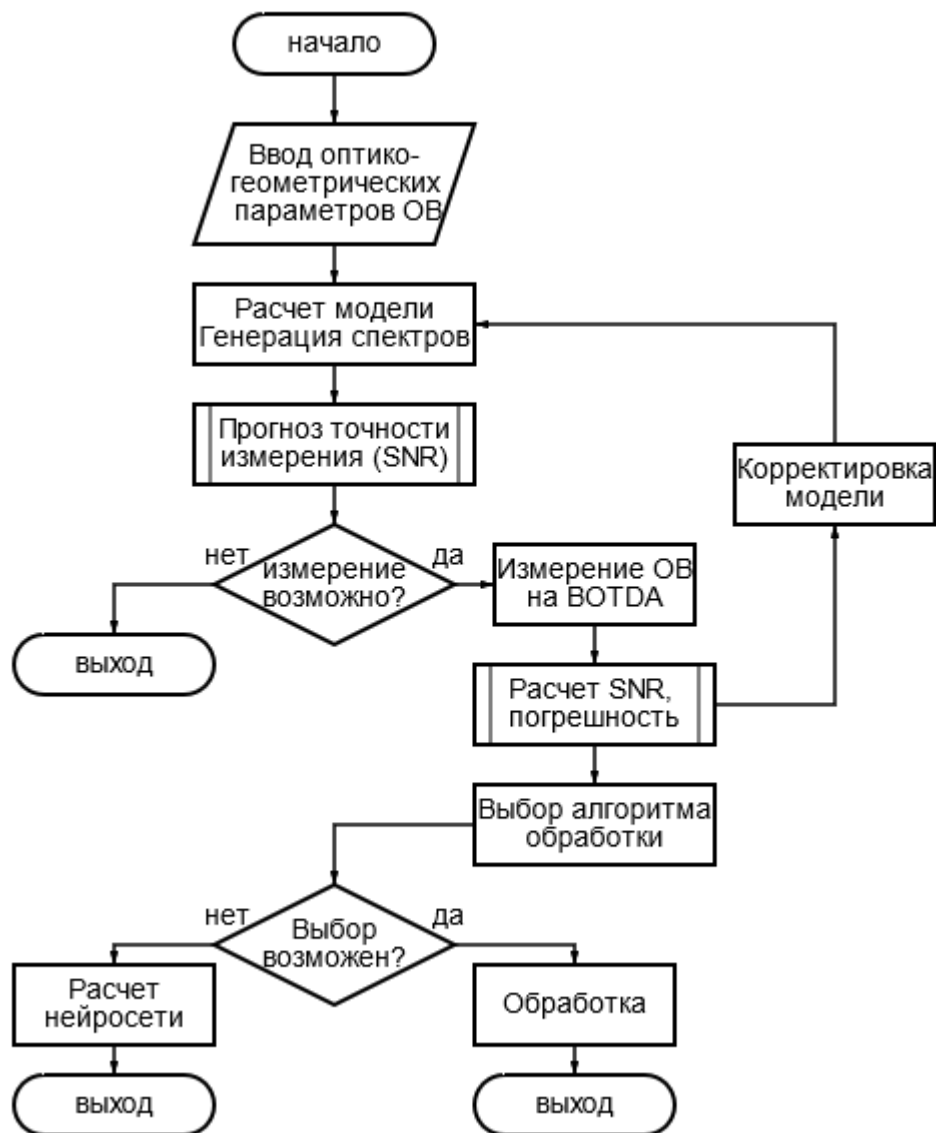


Рисунок 4.1. Схема работы автоматизированной системы измерения пространственного распределения бриллюэновского сдвига частоты в волоконном световоде.

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 спектра ВРМБ путем симуляции процесса рефлектометрии 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 при работе в составе датчика. Если обнаруживается значительное несоответствие между данными модели и эксперимента (более 0,5 МГц), 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 [136].

Известно, что в нормальной системе координат матрица Джонса фазовой пластинки длиной L с показателями преломления n_1 и n_2 (m -го участка волокна) принимает вид: $M_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i \Delta\varphi} \end{bmatrix}$, где $\Delta\varphi = \frac{2 \pi L (n_2 - n_1)}{\lambda}$ - фазовая задержка медленной компоненты волны, обусловленная разницей показателей преломления.

Поскольку рассматриваемый участок волокна ввиду закрутки повернут на определенный угол θ_m (пропорциональный расстоянию от конца волокна до участка, $\theta_m = \alpha L_m$, где α - коэффициент закрутки, в рад/км, L_m - пространственная координата m -го участка), в нормальной системе координат матрица Джонса преобразуется соответствующим образом:

$$T_m = T_{\text{rot}}(\theta_m) M_m T_{\text{rot}}(-\theta_m), \quad (41)$$

где $T_{\text{rot}}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$ - матрица поворота.

Стоит отметить, что при распространении по волокну обратно-рассеянного излучения, закрутка оптического волокна меняет знак, поэтому выражение для матрицы Джонса на том же участке оптического волокна изменится соответствующим образом:

$$T_m^* = T_{\text{rot}}(-\theta_m) M_m T_{\text{rot}}(\theta_m), \quad (42)$$

Для выражения пространственной развертки мощности обратно рассеянного излучения в момент времени t_n можно воспользоваться выражением, представленным в работе [14]:

$$E_{n-1} = F_0 b_{n-1} \prod_{i=1}^n (f_i)^2 \quad (43)$$

где E_{n-1} – уровень обратно-рассеянного излучения на фрагменте $(n - 1)$; F_0 – уровень излучения, введенного в световод; b и f – коэффициенты, определяющие параметры отражения и затухания на заданном фрагменте. Применив схожую идеологию для рассмотрения поляризационных рефлектограмм, когда линейно-поляризованный свет вводится в волокно под углом 0 градусов, выражения для обратно-рассеянного излучения примут следующий вид:

$$\begin{bmatrix} E_{x(0)}(z) \\ E_{y(0)}(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ext_{pol} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \prod_{m=1}^z T_m^* \prod_{m=z}^1 T_m \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

где Ext_{pol} – поляризационная экстинкция поляризатора LP. По полученным $E_{x(0)}(z)$ и $E_{y(0)}(z)$ можно рассчитать величину сигнала обратного рассеяния.

В том случае, если элементы вектор-столбца, полученного в выражении выше, находятся в предварительно установленных в АСИ допустимых пределах, система продолжает процесс измерения.

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.

Методы определения BFS описаны в непрерывном (аналитическом) виде в предыдущих частях диссертации. Ниже представлена их упрощенная алгоритмическая реализация (см. рисунки 4.2 и 4.3).

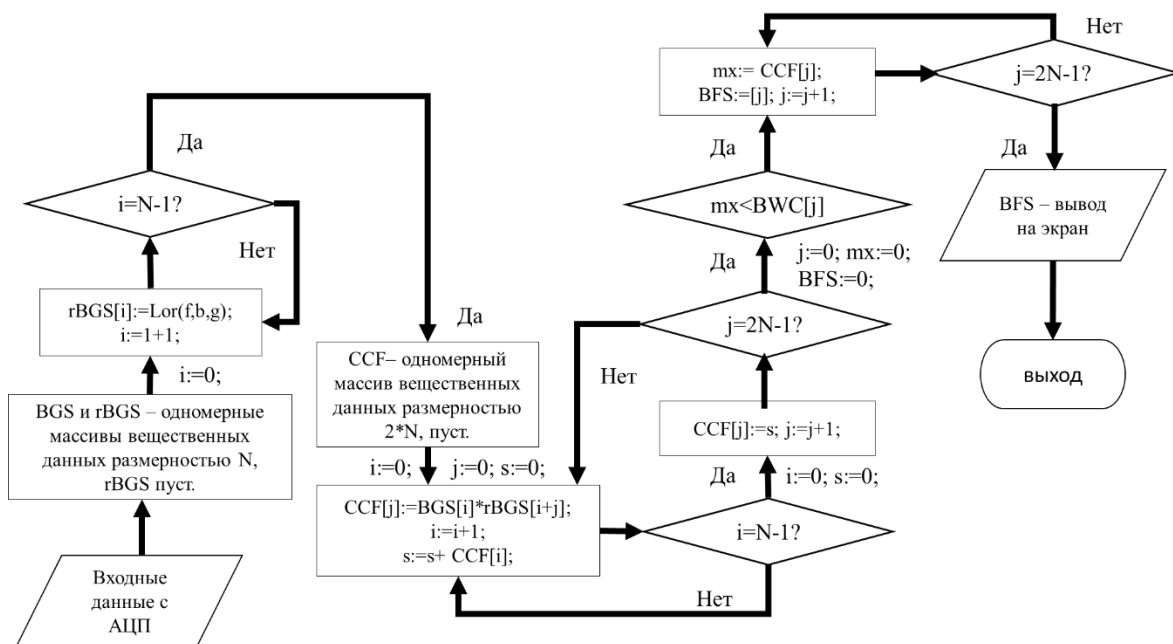


Рисунок 4.2 – Алгоритмическая реализация алгоритма ССМ в АСИ.

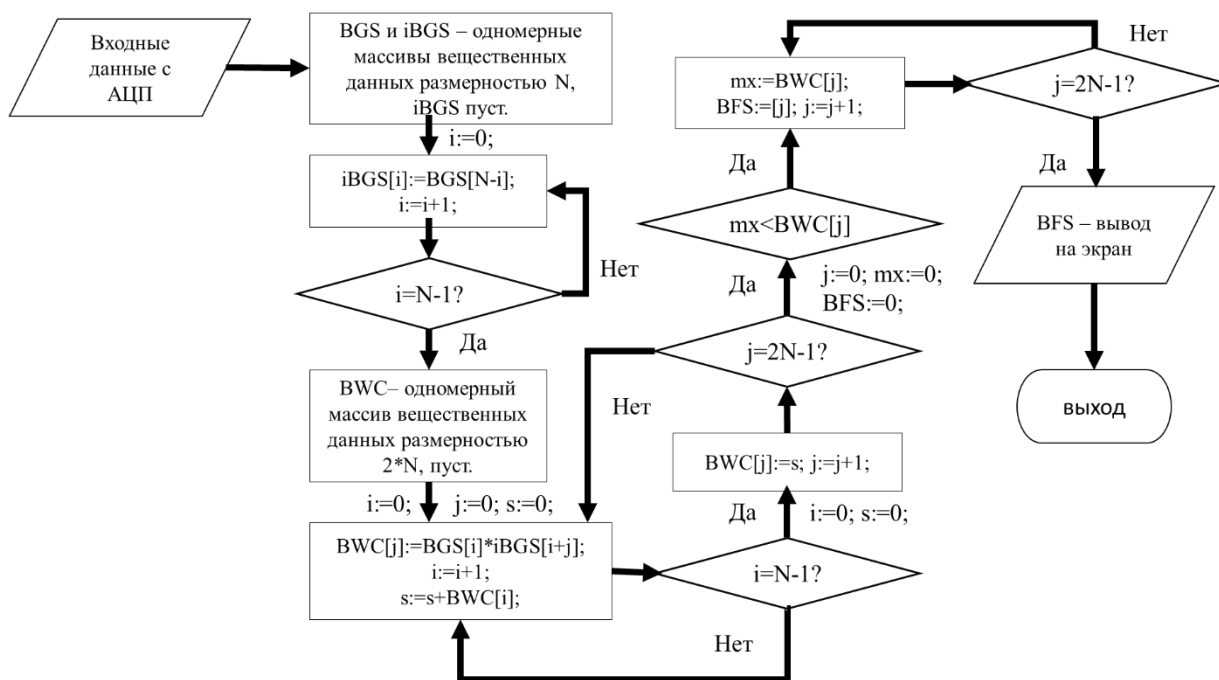


Рисунок 4.3 – Алгоритмическая реализация алгоритма BWC в АСИ.

Из представленных блок-схем видно, что оба алгоритма имеют приблизительно одинаковое количество математических операций. Однако, стоит отметить, что значение BFS, полученное методом BWC, ещё нужно адаптировать с учетом "зеркальности" двух исследуемых функций.

4.2. Интеграция методов машинного обучения в автоматизированную систему

4.2.1. Классическая нейронная сеть прямого распространения

Классическая нейронная сеть, представляющая собой многослойный персептрон используется для уточнения BFS. Эмпирическим методом была подобрана структура сети, позволяющая получить наиболее высокую точность определения BFS. Результирующая структура сети состояла из пяти входных нейронов, двух скрытых слоев и одного выходного нейрона. Первый скрытый слой имеет 50 нейронов, а второй – 25. Структура сети представлена на рисунке 4.4.

Результаты вычисления BFS тремя методами, а также SNR спектра и информация об области провала подаются на вход нейронной сети.

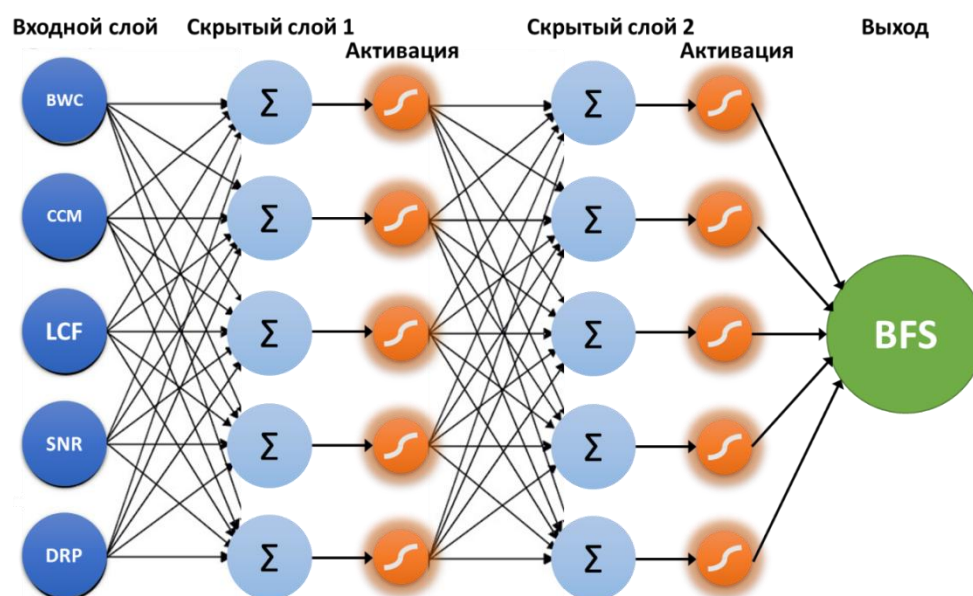


Рисунок 4.4. Структура нейронной сети. BWC – результат метода обратной корреляции, CCM – классического метода кросс-корреляции, LCF – аппроксимация лоренцевой функцией, SNR – отношение сигнал-шум, Δ_{art} – ширина области дефекта

В качестве функции активации нейронов использовалась сигмоидальная функция [137].

Обучение сети производилось по методу обратного распространения ошибки. В этом случае ошибка выходного нейрона выражается следующим образом:

$$E_{out} = O_{out} - O_{target}, \quad (45)$$

где O_{out} – значение выходного нейрона, O_{target} – целевое значение.

Ошибка скрытого слоя при этом выражается как:

$$E_{hid} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{i1} & \cdots & w_{ij} \end{bmatrix}^T \cdot E_{out}, \quad (46)$$

где w_{ij} – коэффициент связи между скрытым нейроном i , связанным с ним, выходным нейроном j .

Исходя из полученных значений ошибок скрытого слоя можно скорректировать весовые коэффициенты связей между нейронами.

$$\Delta w_{ij} = \alpha * [E_{out} * O_{out} * (1 - O_{out})] \cdot O_{hid}^T, \quad (47)$$

где O_{hid} – матрица выходных значений скрытого слоя.

Аналогичным образом происходит корректировка весовых коэффициентов между двумя скрытыми слоями.

Соотношение между обучающей и тестовой выборкой составило 75 и 25 % соответственно. Верификация работоспособности сети проводилась на задаче распознавания рукописного набора цифр базы данных MNIST. Точность распознавания при этом составила более 97%, что соответствует результатам, представленным в литературе [138].

Для каждого метода обработки спектров BGS было рассчитано стандартное отклонение ошибки определения BFS. Сравнительные

характеристики методов расчета максимума для смоделированных спектров приведены в таблице 4.1 [139, 140].

Таблица 4.1. Сравнение результатов расчета

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

Анализ результатов показал увеличение точности определения BFS на величину порядка 10% при использовании нейронной сети. Кроме того, ошибка при усреднении трёх значений, полученных стандартными методами, также оказалась выше, чем ошибка нейронной сети (7,4 МГц против 6,4 МГц). Это демонстрирует, что нейронная сеть не рассчитывает не среднее значение BFS, а более точное.

4.2.2. Обобщенная линейная модель

Обобщенная линейная модель (ОЛМ) – это расширение общей линейной модели в машинном обучении, которое способно рассчитать отклик основываясь на методе максимального правдоподобия к обучающему набору данных [43, 111]. Это позволяет обрабатывать функции с различным распределением вероятности, таких как гауссово, пуассона, нормальное распределение и другие. Модель рассчитывает среднее значение и сравнивает его с линейным предиктором используя функцию связи. В ОЛМ выделяют три основных компоненты: случайная компонента, систематическая компонента и функция связи. Функция связи связывает две другие компоненты друг с другом. Случайная компонента, представляющая собой распределение данных, с линейным предиктором систематической компоненты, задается в виде:

$$\eta_0 = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} \quad (48)$$

где β_k – расчетный коэффициент, X_{ik} – независимая переменная. Затем, при помощи функции связи математическое ожидание зависимой переменной передается в линейный предиктор, который задается как:

$$g(\mu_i) = \eta_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} \quad (49)$$

где μ_i – ожидаемый отклик.

Физический смысл ОЛМ можно представить в виде, представленном на рисунке 4.5. Поскольку изменение сдвига ВРМБ линейно относительно температуры, ОЛМ отлично подходит для прямого определения температуры ОВ.

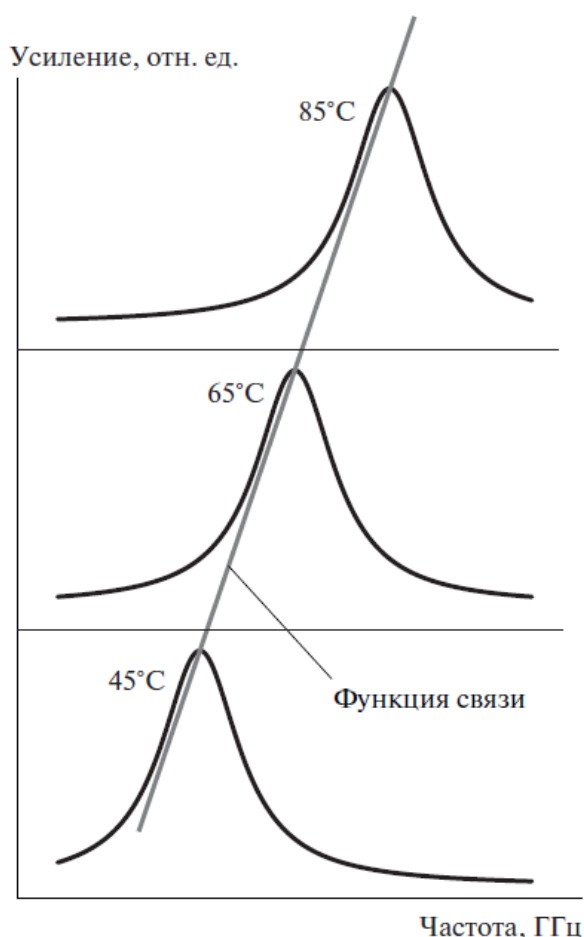


Рисунок 4.5. Использование ОЛМ для детектирования сдвига ВРМБ

Случайная компонента, отложенная по оси абсцисс, является распределением сдвига ВРМБ, а систематическая компонента – величиной

усиления спектра. Задача функции связи – связать обе компоненты друг с другом.

Перед применением ОЛМ для вычисления температуры ОВ необходимо произвести обучение модели. Для этого, в первую очередь, необходимо экспериментально получить распределение спектров ВРМБ для каждого значения температуры ОВ. Полученные пары спектр-температура образуют, таким образом, набор данных, используемый для обучения.

Стоит отметить, что при обучении модели очень важно избежать переобучения, что может привести к ухудшению точности, особенно в случаях, когда измеренные спектры в достаточной степени зашумлены. В представленном случае использования ОЛМ, такой подход называют регуляризацией.

Для оценки такого комбинированного способа была реализована следующая схема проведения эксперимента, представленная на рисунке 4.4.

В первую очередь, были экспериментально получены спектры ВРМБ ОВ при различных температурах нагрева. Для извлечения спектров использовалась экспериментальная установка, представленная на рисунке 2.3 в главе 2. Затем для полученных спектров были сгенерированы дополнительные шумы, как было показано в главе 2. Результирующий набор данных был обработан при помощи известного алгоритма аппроксимации функцией Лоренца, методом обратной корреляции, представленным в главе 3, а также методом ОЛМ. После обработки методом аппроксимации функцией Лоренца и методом обратной корреляции набор данных был использован для прямого получения значений температуры ОВ, а также дополнительно был использован для повторной обработки методом ОЛМ.

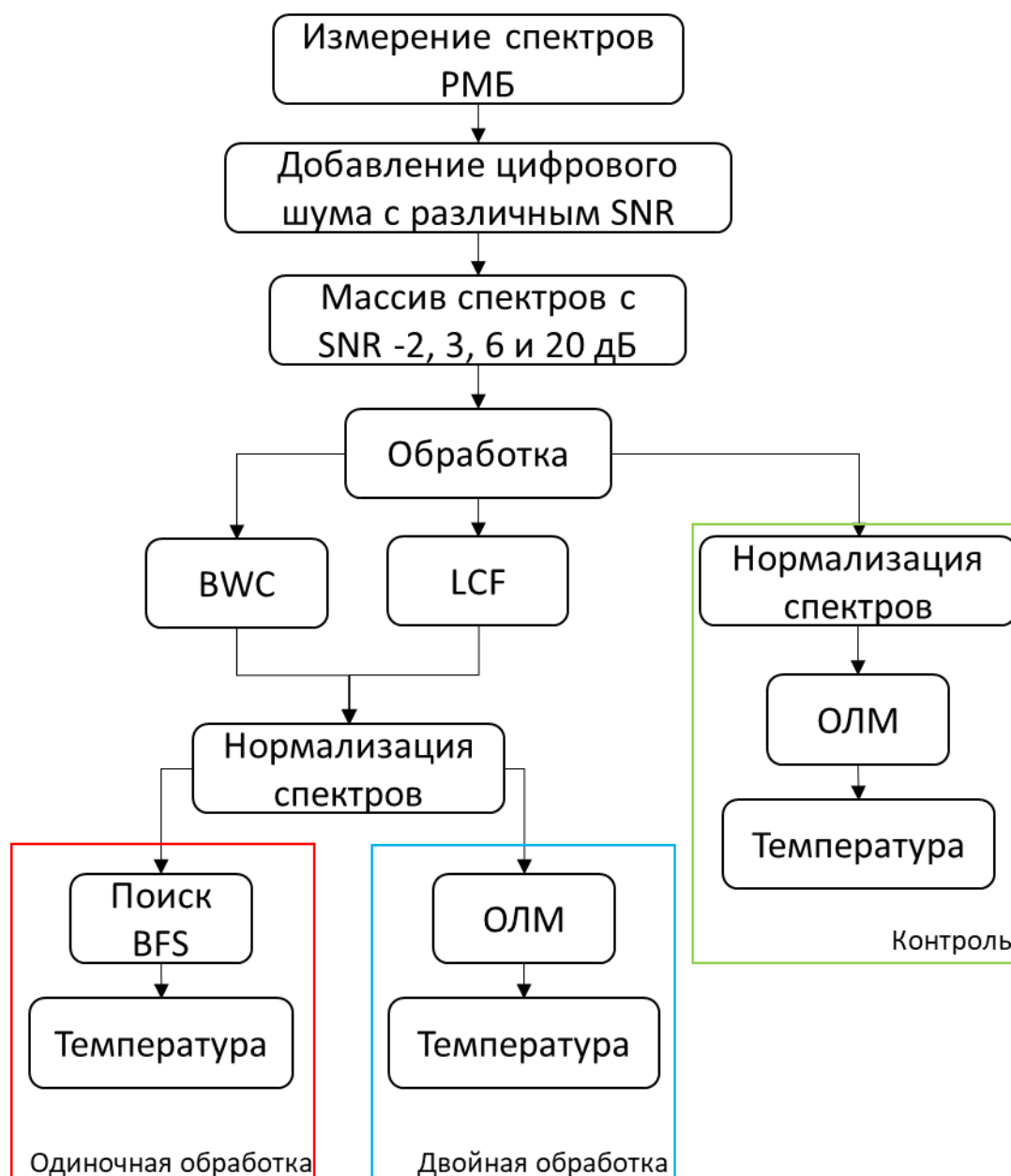


Рисунок 4.4. Блок-схема принципа обработки данных

Для тестирования использовались наборы спектров с соотношениями сигнал-шум равным -2, 3, 6 и 20 дБ. Ошибка определения температуры ОБ вычислялась как разница между показаниями датчика температуры при проведении измерения спектров ВРМБ и температуры, полученной в результате обработки спектров представленными выше методами. На графиках ниже представлено распределение ошибок определения температуры для случая нагрева до 75 °С. По оси абсцисс отложена длина

ОВ, соответствующая 100 спектрам ВРМБ, а по оси ординат отложена абсолютная ошибка, рассчитанная для каждого метода (рисунок 4.5).

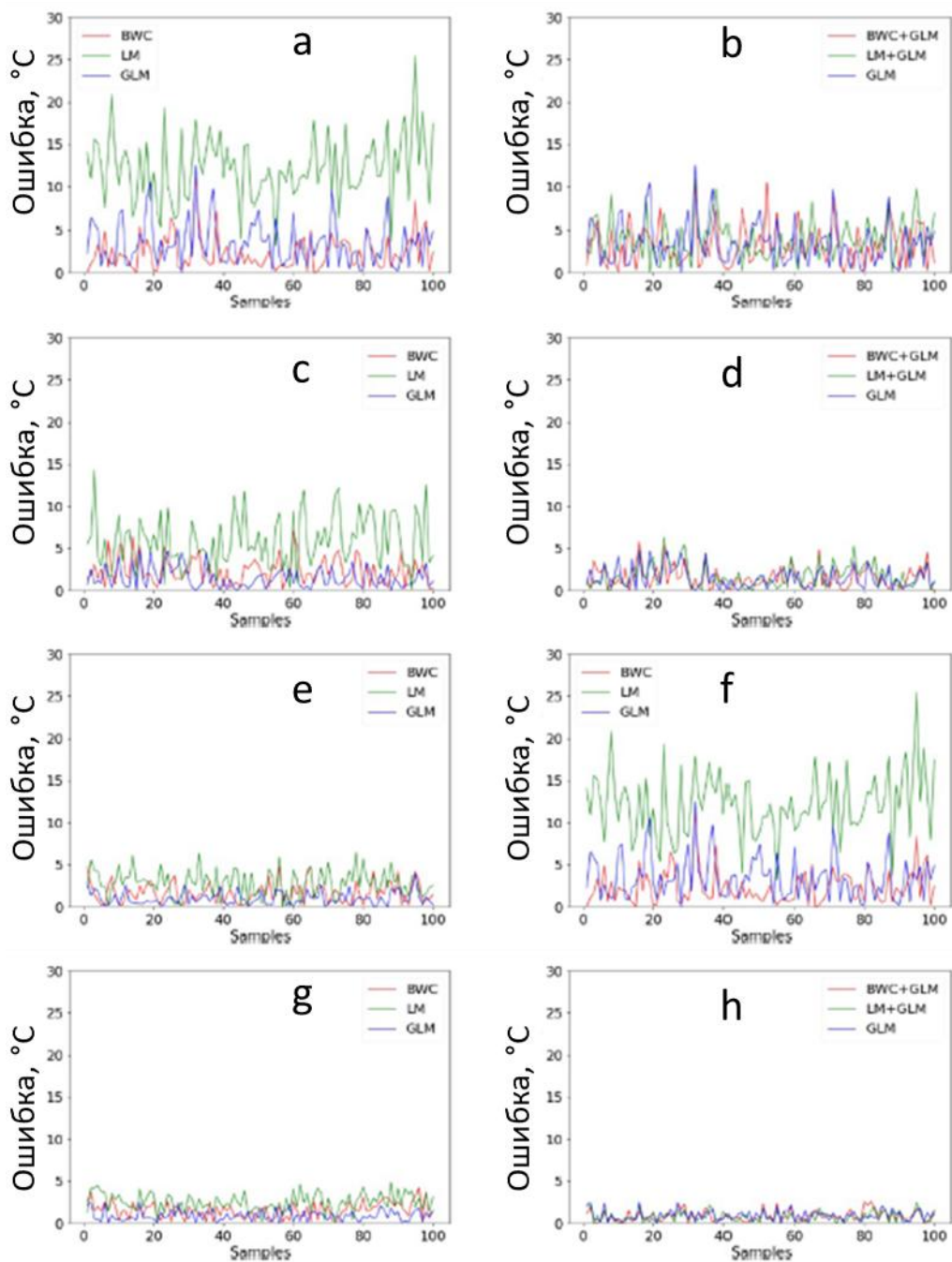


Рисунок 4.5. Абсолютная ошибка, полученная после обработки данных: **(а)** -2 дБ одиночная обработка; **(б)** -2 дБ двойная обработка **(с)** 3 дБ одиночная обработка; **(д)** 3 дБ двойная обработка; **(е)** 6 дБ одиночная обработка **(ф)**; 6 дБ двойная обработка; **(г)** 20 дБ одиночная обработка; **(h)** 20 дБ двойная обработка.

На графиках слева представлены результаты одиночной обработки спектров, в то время как на графиках справа показаны результаты

комбинированного способа обработки данных. На всех графиках также представлен опорный график, на котором зашумленные спектры были обработаны только с использованием ОЛМ. Можно отметить, что абсолютная ошибка была значительно уменьшена при использовании двойной обработки.

Для случая отношения сигнал-шум в -2 дБ ошибка для метода аппроксимации функцией Лоренца составила 25.5 °С, при двойной обработке с использованием ОЛМ – 11 °С. В то же время при использовании метода обратной корреляции ошибка – 11.2 °С, а при двойной обработке с ОЛМ – 10.9 °С. Стоит отметить, что ошибка при обработке спектра только методом ОЛМ в этом случае составила 12.5 °С.

Что касается SNR в 3 дБ, то разница в ошибке между одиночной и двойной обработкой для аппроксимации функцией Лоренца составляет 7.9 °С и 1.3 °С для метода обратной корреляции. В то время как для SNR в 6 дБ погрешность улучшилась на 0.9 °С для метода двойной обработки с использованием аппроксимации функцией Лоренца и на 1.4 °С для метода двойной обработки с использованием метода обратной корреляции. Наконец, для SNR в 20 дБ улучшение при использовании метода двойной обработки составляет 2.4°С для аппроксимации функцией Лоренца и 1.7°С для метода обратной корреляции.

Помимо этого, было отмечено, что для случая очень высокого зашумления (-2 дБ) метод обратной корреляции показал лучшие результаты при одиночной обработке данных, как показано на рисунке 4.6 справа.

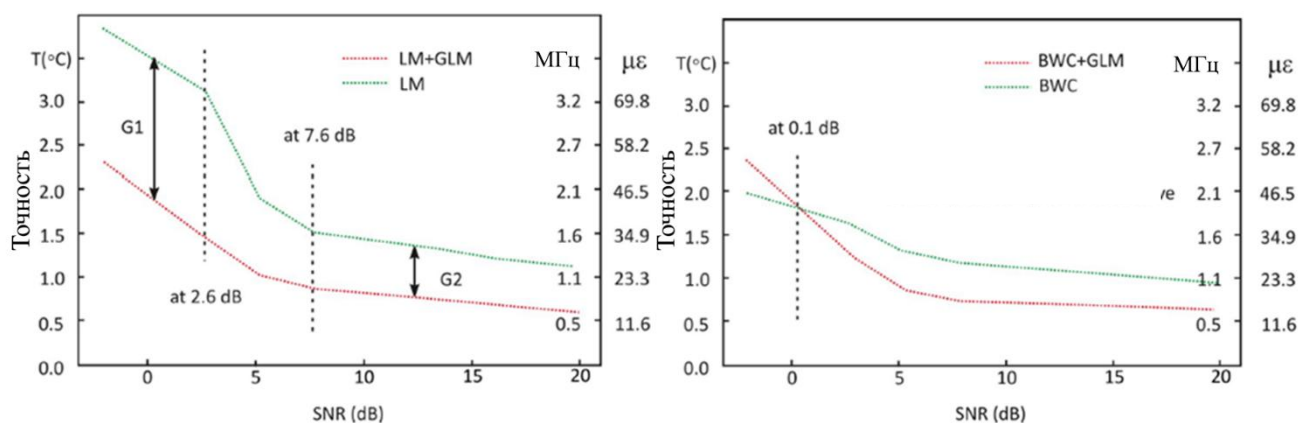


Рисунок 4.6. Сравнение точности определения ВРМБ при использовании одиночной и двойной обработки при различных SNR. Левый график - с использованием LCF; правый - с использованием BWC.

Как видно из представленных выше графиков, двойная обработка данных более эффективна почти во всех случаях.

4.3. Результаты эксплуатации элементов АСИ в технологическом процессе

Внедрение разработанных элементов системы проводилось в ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» применительно к изделиям, поступающим с производственного участка и исследовательской лаборатории.

Анализ эффективности использования элементов системы производился путем проведения ретроспективы изготовленных изделий из специальных волоконных световодов в 2021 году. По результатам анализа было установлено, что за счет повышения точности отбора оптических волокон типа «панда» увеличение выхода годной продукции составило порядка 10 %.

Кроме того, своевременное применение методик распределенного контроля позволило снизить общее время технологического контроля на величину порядка 12 %. Это обусловлено автоматизацией обработки данных,

получаемых при измерении параметров изделий, а также своевременной отбраковкой и недопущением изделия до дальнейшей эксплуатации.

Результат внедрения подтвержден соответствующим актом (приложение А).

Выводы по главе 4

1. Разработана и описана концепция автоматизированной системы контроля качества специальных оптических волокон методом бриллюэновской рефлектометрии для использования в распределенных волоконно-оптических датчиках.

2. Описана подсистема, основанная на использовании нейросетевого алгоритма для получения более точного значения сдвига ВРМБ в СВС. Использование алгоритма позволило увеличить точность определения сдвига ВРМБ на величину до 10% по сравнению с известными методами.

3. Представлена интеграция разработанного метода обратной корреляции с методом обобщенной линейной модели. 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. В случае экстремально зашумленных сигналов разница между одиночной и двойной обработкой составила 1.6 МГц в пользу двойной обработки спектров.

Заключение

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. Оптическая рефлектометрия, как средство распределенного контроля характеристик ВС, а также параметров внешней среды, является важным инструментом технического контроля качества производимых ВС;

2. Разработанная программная реализация модели, 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 стоксовой компоненты спектра рассеяния Мандельштама-Бриллюэна 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 структура автоматизированной системы 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%.

Представленные в работе программно-аппаратные элементы автоматизированной системы измерения бриллюэновского сдвига в оптических волокнах, в перспективе, могут позволить более точно и оперативно производить отбраковку некондиционных фрагментов оптических волокон на последних стадиях производства.

Применение нового метода позволит повысить точность работы распределенных волоконно-оптических датчиков, применяемых для задач одновременного измерения температур и деформаций.

Все результаты работы нашли свое применение в производственном и научно-исследовательском процессе, что подтверждено соответствующими актами.

Список литературы

1. Senior J.M., Jamro M.Y. Optical fiber communications: principles and practice / J.M. Senior, M.Y. Jamro. – 2009. – 1075 p. – ISBN: 978-0-13-032681-2.
2. Barton G.W. Measurement and Control Challenges for the Specialty Optical Fibre Industry in the 21st Century / G.W. Barton, S.H. Law, P. McNamara, T.N. Phan // Proc.5th Asian Control Conf. – 2004. – Vol. 2. – P. 1137-1144.
3. McNamara P. Germanium-Rich «Starburst» cores in silica-based optical fibers fabricated by modified chemical vapour deposition / P. McNamara, K.L. Lyytikaynen, T. Ryan, I.J. Kaplin, S.P. Ringer // J. Opt. Commun. – 2004. – Vol. 230 – P. 45-53.
4. Lyytikainen K. Control of complex structural geometry in optical fibre drawing: PhD thesis, University Of Sydney, 2004. – 273 P.
5. Бубнов, М. М. Физические основы процесса вытяжки волоконных световодов с малыми потерями : дис. ... д. физ.-мат. Наук : 01.04.07/ Бубнов Михаил Михайлович ; ИЦВОРАН – Москва, 2009. – 321 С.
6. Крюков, И.И. Автоматизация и управление процессами проектирования и производства специальных кварцевых оптических волокон: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06 / Крюков Игорь Иванович ; – Пермь, 2006. – 123 С.
7. Kostka F. Control Systems in Optical Fibre Industry/ F. Kostka // Computacion y Sistemas. – 1998. – Vol.1. – No 4. – P. 195-200.
8. Листвин, А.В., Листвин, В.Н. Рефлектометрия оптических волокон/ А.В. Листвин, В.Н. Листвин – М.: ЛЕСАРпт, 2005. – 208 С.
9. Иванов, А.Б., Соколов, И.В. Современные технологии OTDR/ А.Б. Иванов, И.В. Соколов // Электросвязь. – 1998. – 11. – С. 29-33.
10. Alam M. Small form-factor Panda-type HiBi fiber for sensing applications/ M. Alam, D. Guertin, J. Farroni, J. Abramczyk, N. Jacobson, K. Tankala // In Proc. SPIE: Industrial Highway Sensors Technology. – 2004. – Vol. 5272.

11. Hartog A.H. Polarization measurements on monomode fibres using optical time domain reflectometry/ A.H. Hartog, D.N. Payne, A.G. Conduit // IEE Proc. – 1981. – Vol. 128. – No.3. – PP. 168-170.
12. Schuh R.E., Siddiqui A.S. Measurement of SOP evolution along a linear birefringent fibre with twist using polarization OTDR/ R.E. Schuh, A.S. Siddiqui // NIST/IEEE/OSA Symposium on Optical Fibre Measurements. – 1996. – P. 158-162.
13. Бурдин, В.А., Дашков, М.В. Метод измерений длины биений оптических волокон с линейной вариацией длительности зондирующих импульсов/ В.А. Бурдин, М.В. Дашков // Всероссийская конференция по волоконной оптике: сб. науч. тр. – Пермь, 2011. – С.115-116.
14. Константинов, Ю.А. Автоматизация процессов технического контроля качества специальных волоконных световодов на этапах производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06/ Константинов Юрий Александрович; – Пермь, 2012. – 114 С.
15. Азаров, А.В. Система автоматического контроля параметров оптических волокон и волоконно-оптических кабелей: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05/ Азаров Алексей Валентинович; – Москва, 2001. – 114 С.
16. Lupi J. Erbium- and Magnesium-codoped Silica-Based Transparent Glass Ceramic Core Fiber Made by FCVD and Flash Vaporization/ J. Lupi, M. Ude, S. Trzesien, B. Lenardič, H. Guillon, W. Blanc, B. Dussardier // International Conference on Fibre Optics and Photonics. – 2014.
17. Легкий, Н.М. Автоматизированная система контроля качества и диагностики неисправностей радиоэлектронной аппаратуры в процессе производства: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.22/ Легкий Николай Михайлович; – Москва, 2004. – 168 С.
18. Зайцев, Н.Г. Аппаратно-программный комплекс для автоматизации технологического процесса производства приборов микро- и оптоэлектроники: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06/ Зайцев Николай Геннадьевич; – Томск, 2007. – 205 С.

19. Бобырь, М. В. Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом высокоточной обработки деталей: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06/ Бобырь Максим Владимирович; – Курск, 2003. – 131 С.

20. Сисюков, А. Н. Разработка и применение специализированных экспертных систем для САПР технологических процессов механической обработки заготовок: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.14/ Сисюков Артем Николаевич; – Санкт-Петербург, 2007. – 151С.

21. Милостная, Н. А. Автоматизация контроля и управления технологическим процессом высокоточной обработки деталей на основе теории нечеткой логики: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06/ Милостная Наталья Анатольевна; – Курск, 2008. – 113 С.

22. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Заде Л. – М.: Мир, 1976. – 166 С.

23. Стародубцев, И. И. Управление разработкой и производством волоконно-оптических кабелей с помощью математического моделирования и разработки программных комплексов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02./ Стародубцев Иван Игоревич; – Москва, 2003. – 251 С.

24. Барышников, Е. Н. Исследование процесса регулирования технологических параметров при изготовлении оптических модулей с целью оптимизации эксплуатационных характеристик волоконно-оптических кабелей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02/ Барышников Евгений Николаевич; – Москва, 2003. – 221 С.

25. Лофицкий, И. В. Автоматизированный технологический комплекс для производства цифровых волоконно-оптических преобразователей перемещений, дис. ... канд. техн. наук: 05.11.14/ Лофицкий Игорь Вадимович; – Москва, 2005. – 173 С.

26. Власов, А.А. Разработка экспериментальной установки для акустических исследований компонентов волоконно-оптических

измерительных систем/ А.А. Власов, М.Ю. Плотников, А.Н. Аширов, А.С. Алейник, А.Н. Никитенко // ПТЭ. – 2020. – № 4. – С. 58.

27. Бочкова, С.Д. Метод локализации воздействия в композитном материале с помощью волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии/ С.Д. Бочкова, С.А. Волковский, М.Е. Ефимов, И.Г. Дейнека, Д.С. Смирнов, Е.В. Литвинов // ПТЭ. – 2020. – № 4. – С. 73.

28. Власов, А.А. Исследование влияния степени акустической герметизации звукозащитных корпусов волоконно-оптических интерферометров на их характеристики / А.А. Власов, А.В. Варламов, А.Н. Аширов, Н.Е. Кикилич, А.С. Алейник // ПТЭ. – 2020. – № 4. – С. 67.

29. Кузнецов, П.И., Судас, Д.П., Савельев Е.А. Формирование волоконных тейперов методом химического травления для применения в волоконных датчиках и лазерах / П.И. Кузнецов, Д.П. Судас, Е.А. Савельев // ПТЭ. – 2020. – № 4. – С. 83.

30. Фадеев, К.М. Волоконно-оптический датчик одновременного измерения температуры и давления с использованием интерферометра фабри–перо и волоконной брэгговской решетки / К.М. Фадеев, Д.Д. Ларионов, Л.А. Жикина, А.М. Минкин, Д.И. Шевцов // ПТЭ. – 2020. – № 4. – С. 115.

31. Таранов, М.А. О минимальной неопределенности измерения коэффициента затухания в одномодовом оптическом волокне, достижимой с использованием рэлеевской рефлектометрии / М.А. Таранов, Б.Г. Горшков, К.М. Жуков, М.Л. Гринштейн // ПТЭ. – 2020 – № 4. – С. 90.

32. Таранов, М.А., Горшков, Б.Г., Алексеев, А.Э. Достижение 85-километровой дальности измерений деформации (температуры) с помощью низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии / М.А. Таранов, Б.Г. Горшков, А.Э. Алексеев // ПТЭ. – 2020. – № 4. – С. 96.

33. Трегубов, А.В. Модель распределенного калориметрического волоконного дозиметра на основе эффекта вынужденного рассеяния

мандельштама–бриллюэна / А.В. Трегубов, В.В. Приходько, А.С. Алексеев, А.В. Жуков, С.Г. Новиков, В.В. Светухин // ПТЭ – 2020. – № 4. – С. 109.

34. Спири́н, В.В. Использование полупроводникового лазера с захватом частоты в качестве задающего оптического генератора когерентного рефлектометра для распределенных измерений частоты вибраций / В.В. Спири́н, С.А. López-Mercado, M. Wuilpart, Д.А. Коробко, И.О. Золотовский, А.А. Фотиади // ПТЭ. – 2020. – № 4. – С. 40.

35. Ткаченко, А.Ю. Когерентный оптический частотный рефлектометр на основе волоконного лазера с самосканированием частоты для сенсорных применений / А.Ю. Ткаченко, Н.Н. Смолянинов, М.И. Скворцов, И.А. Лобач, С.И. Каблуков // ПТЭ. – 2020. – № 4. – С. 102.

36. Белокрылов, М.Е. Полностью волоконный рефлектометр временной области для измерения длины активных эрбиевых волоконных световодов / М.Е. Белокрылов, Ю.А. Константинов, К.П. Латкин, Д. Клод, Д.А. Селезнев, А.А. Степин, Ю.А. Конин, В.А. Щербакова, Р.Р. Кашина // ПТЭ. – 2020. – № 4. – С. 45.

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

38. Gorshkov, B.G. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective / B.G. Gorshkov, K. Yüksel, A.A. Fotiadi, M. Wuilpart, D.A. Korobko, A.A. Zhirnov, K.V. Stepanov, A.T. Turov, Yu.A. Konstantinov, I.A. Lobach // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 1033.

39. Hotate, K. Brillouin Optical Correlation-Domain Technologies Based on Synthesis of Optical Coherence Function as Fiber Optic Nerve Systems for Structural Health Monitoring/ K. Hotate // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9. – P. 187.

40. Smirnov, A.S. Birefringence in anisotropic optical fibres studied by polarised light Brillouin reflectometry / A.S. Smirnov, V.V. Burdin, Yu.A. Konstantinov, A.S. Petukhov, I.R. Drozdov, Y.S. Kuz'minykh, V.G. Besprozvannykh, // *Quantum Electronics*. – 2015. – Vol. 45. – P. 66.
41. Nordin, N.D., Zan, M., Abdullah, F. Comparative Analysis on the Deployment of Machine Learning Algorithms in the Distributed Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) Fiber Sensor / N.D. Nordin, M. Zan, F. Abdullah // *Photonics*. – 2020. – Vol. 7. – P. 79.
42. Urricelqui J., Soto M., Thévenaz L. Sources of noise in Brillouin optical time-domain analyzers/ J. Urricelqui, M. Soto, L. Thévenaz // *24th International Conference on Optical Fibre Sensors. Proc. of SPIE*. – 2015. – Vol. 9634. – P. 963434.
43. Wang Y., Chen L., Bao X. Single-shot chirped pulse BOTDA for static and dynamic strain sensing / Y. Wang, L. Chen, X. Bao // *Optics Letters*. – 2021. – Vol. 46. – P. 5774-5777.
44. Zheng H., Zhu T., Zhang J. Single shot BOTDA based on optical chirp chain and image denoising / H. Zheng, T. Zhu, J. Zhang // *Optical Fiber Sensors Conference*. – 2020. – P. T3.58.
45. Krivosheev A.I. State-of-art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing (review)/ A.I. Krivosheev, F.L. Barkov, Yu.A. Konstantinov, M.E. Belokrylov // *Instrum. Exp. Tech*. – 2022. – Vol. 65. – No. 5. – P. 687-710.
46. Li, C. SNR enhancement in Brillouin optical time domain reflectometer using multi-wavelength coherent detection/ C. Li, Y. Lu, X. Zhang, F. Wang // *Electronics Letters*. – 2012. – Vol. 48. – P. 1139.
47. Lalam, N. Performance improvement of BOTDR system using wavelength diversity technique/ N. Lalam, W.P. Ng, X. Dai, Q. Wu, Y.Q. Fu // *25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*. – 2017. – Vol. 10323. – P. 1032366.
48. Lalam, N. Performance analysis of Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) employing wavelength diversity and passive depolarizer

techniques/ N. Lalam, W.P. Ng, X. Dai, Q. Wu, Y.Q. Fu // Measurement Science and Technology. – 2018. – Vol. 29. – P. 025101.

49. Lalam, N. Performance Improvement of Brillouin Ring Laser Based BOTDR System Employing a Wavelength Diversity Technique/ N. Lalam, W.P. Ng, X. Dai, Q. Wu, Y.Q. Fu // Journal of Lightwave Technology. – 2018. – Vol. 36. – P. 1084.

50. Wang, F. Using a Mach–Zehnder-interference-based passive configuration to eliminate the polarization noise in Brillouin optical time domain reflectometry/ F. Wang, C. Li, X. Zhao, X. Zhang // Applied optics. – 2012. – Vol. 51. – P. 176.

51. Zhao, Y. High Sensitive BOTDR Demodulation Method by Using Slow-Light in Fiber Grating / Y. Zhao, Y. Zhang, B.T. Han, C. Qin, Q. Wang // Journal of Lightwave Technology. – 2013. – Vol. 31. – P. 334551.

52. Wang, Q. A novel brillouin optical time-domain reflectometer demodulating method based on a slow-light mach-zehnder interferometer / Q. Wang, Y. Zhao, B.T. Han, Y. Zhang, P. Wang, L. Wang // Instrumentation Science & Technology. – 2014. – Vol. 42. – P. 290.

53. Cao, Y. Mitigation of polarization fading in BOTDR sensors by using optical pulses with orthogonal polarizations / Y. Cao, Q. Ye, Z. Pan, H. Cai, R. Qu, Z. Fang, H. Zhao // 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. (Santander, Spain). – 2014. – Vol. 9157.

54. Urricelqui, J. Polarization Diversity Scheme for BOTDA Sensors Based on a Double Orthogonal Pump Interaction / J. Urricelqui, F. López-Fernandino, M. Sagues, A. Loayssa // Journal of Lightwave Technology. – 2015. – Vol. 33. – P. 2633.

55. Floch, S.L., Sauser, F. New improvements for Brillouin optical time-domain reflectometry / S.L. Floch, F. Sauser // 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS). – 2017. – Vol. 10323. – P. 10323OL.

56. Lu, Y. Influence of non-perfect extinction ratio of electro-optic modulator on signal-to-noise ratio of BOTDR / Y. Lu, Y. Yao, X. Zhao, F. Wang, X. Zhang // *Optics Communications*. – 2013. – Vol. 297. – P. 48.
57. Zhang, Y. Performance improvement for long-range BOTDR sensing system based on high extinction ratio modulator / Y. Zhang, X. Wu, Z. Ying, X. Zhang // *Electronics Letters*. – 2014. – Vol. 50. – P. 1014.
58. Bai, Q. Enhancing the SNR of BOTDR by Gain-Switched Modulation / Q. Bai, B. Xue, H. Gu, D. Wang, Y. Wang, M. Zhang, B. Jin, Y. Wang // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2019. – Vol. 31. – P. 283.
59. Hao, Y. Effects of modulated pulse format on spontaneous Brillouin scattering spectrum and BOTDR sensing system / Y. Hao, Q. Ye, Z. Pan, H. Cai, R. Qu, Z. Yang // *Optics and Laser Technology*. – 2013. – Vol. 46. – P. 37.
60. Xia, L. A Distributed Brillouin Temperature Sensor Using a Single-Photon Detector / L. Xia, J. Hu, Q. Zhao, J.J. Chen, P. Wu, X. Zhang // *IEEE Sensors Journal*. – 2016. – Vol. 16. – P. 2180.
61. Xia, H. Brillouin optical time-domain reflectometry using up-conversion single-photon detector / H. Xia, S. Mingjia, G. Shentu, C. Wang, J. Qiu, M. Zheng, X. Xie, X. Dou, Q. Zhang, J. Pan // *Optics Communications*. – 2016. – Vol. 381. – P. 37.
62. Saxena, M.K. Raman optical fiber distributed temperature sensor using wavelet transform based simplified signal processing of Raman backscattered signals / M.K. Saxena, S.J. Raju, R. Arya, R.B. Pachori, S. Ravindranath, S. Kher, S.M. Oak // *Optics and Laser Technology*. – 2015. – Vol. 65. – P. 14.
63. Wei, H. New BFS Retrieval Technique for Brillouin Optical Time Domain Analysis Sensor System / H. Wei, Y. Wang, Q. Wang, X. Lu, H. Wu, L. Fan, C. Li, X. Xin // *Electronics*. – 2021. – Vol. 10. – P. 1334.
64. Qin, Z., Chen, L., Bao, X. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR / Z. Qin, L. Chen, X. Bao // *Opt. Express*. – 2012. – Vol. 20. – P. 20459.

65. Zhang, Z.-H. The research of optical fiber Brillouin spectrum denoising based on wavelet transform and neural network / Z.-H. Zhang, W.-L. Hu, J.-S. Yan, P. Zhang // International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Fiber Optic Sensors and Optical Coherence Tomography. Proc. SPIE. – 2013. – Vol. 8914. – P. 891408.
66. Xu, H.-Z., Zhang, D. Wavelet-Based Data Processing for Distributed Fiber Optic Sensors/ H.-Z. Xu, D. Zhang // 2006 International Conference on in Machine Learning and Cybernetics. 13-16 August. – 2006. – P. 4040.
67. Saxena, M.K. Optical fiber distributed temperature sensor using short term Fourier transform based simplified signal processing of Raman signals / M.K. Saxena, S.J. Raju, R. Arya, S. Ravindranath, S. Kher, S.M. Oak // Measurement. – 2014. – Vol. 47. – P. 345.
68. Meng, Y., Zha, J. Intensifying the SNR of BOTDA using adaptive constrained least squares filtering / Y. Meng, J. Zha // Optics Communications. – 2018. – Vol. 437. – P. 219
69. Wu, H. Brillouin optical time domain analyzer sensors assisted by advanced image denoising techniques / H. Wu, L. Wang, Zh. Zhao, N. Guo, C. Shu, Ch. Lu // Opt. Express. – 2018. – Vol. 26. – P. 5126.
70. Zhang, Y. Noise reduction by Brillouin spectrum reassembly in Brillouin optical time domain sensors / Y. Zhang, Y. Lu, Z. Zhang, J. Wang, C. He, T. Wu // Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – Vol. 125. – P. 105865.
71. Soto, M., Ramírez, J., Thévenaz, L. Optimizing Image Denoising for Long-Range Brillouin Distributed Fiber Sensing / M. Soto, J. Ramírez, L. Thévenaz // Journal of Lightwave Technology. – 2018. – Vol. 36. – № 4. – P. 1168.
72. Konstantinov, Yu.A. Polarisation reflectometry of anisotropic optical fibres / Yu.A. Konstantinov, I.I. Kryukov, V.P. Pervadchuk, A.Yu. Toroshin // Quantum Electronics. – 2009. – Vol. 39. – P. 1068.
73. Froggatt, M.E. Characterization of Polarization-Maintaining Fiber Using High-Sensitivity Optical-Frequency-Domain Reflectometry / M.E. Froggatt,

D.K. Gifford, S. Kreger, M. Wolfe, B.J. Soller // Journal of Lightwave Technology. – 2006. – Vol. 24. – P. 4149.

74. Farahani, M.A., Castillo-Guerra, E., Colpitts, B.G. Accurate estimation of Brillouin frequency shift in Brillouin optical time domain analysis sensors using cross correlation / M.A. Farahani, E. Castillo-Guerra, B.G. Colpitts // Opt. Lett. – 2011. – Vol. 36. – № 21. – P. 4275.

75. Farahani, M.A., Castillo-Guerra, E., Colpitts, B.G. A Detailed Evaluation of the Correlation-Based Method Used for Estimation of the Brillouin Frequency Shift in BOTDA Sensors / M.A. Farahani, E. Castillo-Guerra, B.G. Colpitts // IEEE Sens. J. – 2013. – Vol. 13. – № 12. – P. 4589.

76. Brown, A.W., Colpitts, B.G., Brown, K. Dark-Pulse Brillouin Optical Time-Domain Sensor With 20-mm Spatial Resolution/ A.W. Brown, B.G. Colpitts, K. Brown // J. Lightwave Technol. – 2007. – Vol. 25. – P. 381.

77. Ravet, F. Pipeline buckling detection by the distributed Brillouin sensor / F. Ravet, L. Zou, X. Bao, L. Chen, R.F. Huang, H.A. Khoo // Ansari F. Sensing issues in civil structural health monitoring. – 2005. – P. 515-524.

78. Shahna, M. H. Performance analysis of frequency shift estimation techniques in Brillouin distributed fiber sensors / M. H. Shahna, Zh. Yang, L. Thévenaz, D. Venkitesh, B. Srinivasan // Opt. Express. – 2018. – Vol. 26. – P. 14661-14677.

79. Li, M. Cross correlation peak-seeking technique of BOTDR based on the incomplete Brillouin spectrum / M. Li, W. Shen, W. Li, H. Li, Y. Tang, Y. Song, X. Zhang. // Optics Communications. – 2019. – Vol. 438. – P. 1.

80. Stepanov, K.V. Sensitivity Improvement of Phi-OTDR by Fiber Cable Coils / K.V. Stepanov, A.A. Zhirnov, K.I. Koshelev, A.O. Chernutsky, R.I. Khan, A.B. Pnev // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 21. – P. 7077.

81. Stepanov, K. The Sensitivity Improvement Characterization of Distributed Strain Sensors Due to Weak Fiber Bragg Gratings / K. Stepanov, A. Zhirnov, A. Chernutsky, K. Koshelev, A. Pniiov, A. Lopunov, O. Butov // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – № 22. – P. 6431.

82. Krivosheev, A.I. Comparative Analysis Of The Brillouin Frequency Shift Determining Accuracy In Extremely Noised Spectra By Various Correlation Methods / A.I. Krivosheev, Yu.A. Konstantinov, F.L. Barkov, V.P. Pervadchuk // *Instrum. Exp. Tech.* – 2021. – №5. – P. 715-719.
83. Su, L. A fast cross-correlation method for temperature extraction in BOTDR sensors / L. Su, B. Chen, X. Liu, Z. Zhou, M. Song, Y. Wang, J. Yang // *Asia Communications and Photonics Conference.* – 2021. – P. T4A.238.
84. Sandstrom L. High Performance, In-service Correlation OTDR / L. Sandstrom, D. Joffe, G. Bekken, J. Brooks, K. Schneider, R. Goodson // *Optical Fiber Communication Conference.* – 2013. – P. OW3G.3.
85. Wang, B.-J. Improvement of Signal-to-Noise Ratio in the Chaos Correlation OTDR / B.-J. Wang, A. Wang, H.-K. Wang, Y. Wang // *Symposium on Photonics and Optoelectronics.* – 2012. – P. 1.
86. Elgaud, M. Digital Filtering Techniques for Performance Improvement of Golay Coded TDM-FBG Sensor / M. Elgaud, M. Zan, A. Abushagur, A.E. Hamzah, M.H.H. Mokhtar, N. Arsad, A.A. Bakar // *Sensors.* – 2021. – Vol. 21. – № 13. – P. 4299.
87. Hotate, K. Recent achievements in BOCDA/BOCDR/ K. Hotate // *Sensors.* – 2014. – P. 142.
88. Choi, B.-H. Application of the Proposed Fiber Optic Time Differential BOCDA Sensor System for Impact Damage Detection of a Composite Cylinder / B.-H. Choi, D.-C. Seo, Y.-S. Kwon, I.-B. Kwon // *Appl. Sci.* – 2021. – Vol. 11. – P. 10247.
89. Soto, M. A. Bipolar optical pulse coding for performance enhancement in BOTDA sensors / M. A. Soto, S. L. Floch, L. Thévenaz // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21. – P. 16390.
90. Soto, M.A. Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range / M.A. Soto, G. Bolognini, F. Di Pasquale, L. Thévenaz // *Opt. Lett.* – 2010. – V. 35 – № 2. – P. 259.

91. Soto, M.A. Analysis of pulse modulation format in coded BOTDA sensors / M.A. Soto, G. Bolognini, F. Di Pasquale // *Opt. Express.* – 2010. – Vol. 18 – № 14. – P. 14878.
92. Soto, M.A. Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120km distance employing optical preamplification / M.A. Soto, G. Bolognini, F. Di Pasquale // *Opt. Lett.* – 2011. – Vol. 36 – № 2. – P. 232.
93. Soto, M.A. Analysis of optical pulse coding in spontaneous Brillouin-based distributed temperature sensors / M.A. Soto, G. Bolognini, F. Di Pasquale // *Opt. Express.* – 2008. – Vol. 16 – № 23. – P. 19097.
94. Nazarathy, M. Real-time long range complementary correlation optical time domain reflectometer / M. Nazarathy, S.A. Newton, R.P. Giffard, D.S. Moberly, F. Sischka, W.R. Trutna, S. Foster // *J. Lightwave Technol.* – 1989. – Vol. 7 – № 1. – P. 24.
95. Zan, M. Simulation Analysis on the Simultaneous Deployment of Brillouin Gain and Loss in Coded Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) Fiber Sensor / M. Zan, M. Elgaud, A. Zainuddin, A. Kadhim, M. H. Mokhtar, N. Arsad, A. A. Bakar // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2021. – Vol. 1892. – P. 012034.
96. Li, Ch., Li, Y. Fitting of Brillouin Spectrum Based on LabVIEW / Ch. Li, Y. Li // *5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing.* (Beijing, China). – 2009.
97. Lourakis, M.L., Argyros, A.A. Is Levenberg-Marquardt the most efficient optimization algorithm for implementing bundle adjustment? / M.L. Lourakis, A.A. Argyros // *10th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV).* (Beijing, China). – 2005. – Vol. 2. – P. 1526.
98. Liang Y. Optimized Feedforward Neural Network Training for Efficient Brillouin Frequency Shift Retrieval in Fiber / Y. Liang, J. Jiang, Y. Chen, R. Zhu, C. Lu, Z. Wang // *IEEE Access.* – 2019. – Vol. 7. – P. 68034.

99. Lu, C. Artificial Neural Network for Accurate Retrieval of Fiber Brillouin Frequency Shift With Non-Local Effects / C. Lu, Y. Liang, X. Jia, Y. Fu, J. Liang, Z. Wang // IEEE Sensors Journal. – 2020. – Vol. 20. – P. 8559.
100. Kalam, A. A. Temperature sensing in BOTDA system by using artificial neural network / A. A. Kalam, W. Liang, G. Nan, L. Cheng, T. Hwa // Electronics Letters – 2015. – Vol. 51. – P. 1578
101. Kalam, A. A. Temperature profile extraction using artificial neural network in BOTDA sensor system / A. A. Kalam, W. Liang, G. Nan, L. Cheng, T. Hwa // Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) (Shanghai, China). – 2015. – P. 1.
102. Kalam, A. A. Signal processing using artificial neural network for BOTDA sensor system / A. A. Kalam, W. Liang, G. Nan, T. Hwa, L. Chao // Optics Express. – 2016. – Vol. – 24. – P. 6769.
103. Liang, W. Brillouin optical time domain analyzer enhanced by artificial/deep neural networks / W. Liang, W. Biwei, J. Chao, G. Nan, Y. Changyuan, L. Chao // 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). – 2017. – P. 1.
104. Li, Y., Wang, J. Optimized neural network for temperature extraction from Brillouin scattering spectra / Y. Li, J. Wang // Optical Fiber Technology. – 2020. – Vol. 58. – P. 102314.
105. Ruiz-Lombera, R., Serrano, M. J., Lopez-Higuera, J.-M. Automatic strain detection in a Brillouin Optical Time Domain sensor using Principal Component Analysis and Artificial Neural Networks / R. Ruiz-Lombera, M. J. Serrano, J.-M. Lopez-Higuera // Proc. of IEEE Sensors. – 2014. – P. 1539.
106. Ruiz-Lombera, R. Feasibility study of strain and temperature discrimination in a BOTDA system via artificial neural networks / R. Ruiz-Lombera, A. Piccolo, L. Rodriguez-Cobo, J.-M. Lopez-Higuera, J. Mirapeix // 25th International Conference on Optical Fiber Sensors. – 2017. – Vol. 10323. – P. 103237Z.

107. Ruiz-Lombera, R. Simultaneous Temperature and Strain Discrimination in a Conventional BOTDA via Artificial Neural Networks / R. Ruiz-Lombera, A. Fuentes, L. Rodriguez-Cobo, J.-M. Lopez-Higuera, J. Mirapeix // *Journal of Lightwave Technology*. – 2018. – Vol. 36. – P. 2114.
108. Wu, H. Real-Time Denoising of Brillouin Optical Time Domain Analyzer With High Data Fidelity Using Convolutional Neural Networks / Wu H., Wan Y., Tang M., Chen Y., Zhao C., Liao R., Chang Y., Fu S., Shum P., Liu D. // *Journal of Lightwave Technology*. – 2019. – Vol. 37. – P. 2648.
109. Wu, H. Support Vector Machine based Differential Pulse-width Pair Brillouin Optical Time Domain Analyzer / H. Wu, L. Wang, Z. Zhao, C. Shu, C. Lu // *IEEE Photonics Journal*. – 2018. – Vol. 10. – P. 1.
110. Wu, H. Brillouin Optical Time-Domain Analyzer Assisted by Support Vector Machine for Ultrafast Temperature Extraction / H. Wu, L. Wang, G. Nan, C. Shu, C. Lu // *Journal of Lightwave Technology*. – 2017. – Vol. 35. – P. 4159.
111. Nordin, N.D., Zan, M.S., Abdullah, F. Generalized linear model for enhancing the temperature measurement performance in Brillouin optical time domain analysis fiber sensor / N.D. Nordin, M.S. Zan, F. Abdullah // *Optical Fiber Technology*. – 2020. – Vol. 58. – P. 102298.
112. Koyamada, Y. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers / Y. Koyamada, S. Satō, S. Nakamura, H. Sotobayashi, W. Chujo. // *Journal of Lightwave Technology*. – 2004. – Vol. 22. – P. 631-639.
113. Zou, W., He, Z., Hotate, K. Two-Dimensional Finite-Element Modal Analysis of Brillouin Gain Spectra in Optical Fibers / W. Zou, Z. He, K. Hotate. // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2006. Vol. 18. 2487-2489.
114. Zou, W., Long, X., Chen, J. Brillouin Scattering in Optical Fibers and Its Application to Distributed Sensors / W. Zou, X. Long, J. Chen // *Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications*. – 2015.

115. Soto, M., Thévenaz, L. Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors / M. Soto, L. Thévenaz // *Optics Express*. 2013. – Vol. 21. – № 25. – P. 31347.
116. Nordin, N.D. Improving Prediction Accuracy and Extraction Precision of Frequency Shift from Low-SNR Brillouin Gain Spectra in Distributed Structural Health Monitoring / N.D. Nordin, F. Abdullah; M.S.D. Zan, A.A. A Bakar, A.I. Krivosheev, F.L. Barkov, Y.A. Konstantinov // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – P. 2677.
117. Smirnov, A. S. Birefringence in anisotropic optical fibres studied by polarised light Brillouin reflectometry / A. S. Smirnov, V. V. Burdin, Y. A. Konstantinov, A. S. Petukhov, I. R. Drozdov, Y. S. Kuz'minykh, V. G. Besprozvannykh // *Quantum Electronics*. – 2015. – Vol. 45. – № 1. – P. 66–68.
118. Смирнов, А.С. Разделение Температуры И Деформации В Волокне, Сохраняющем Поляризацию, Методом Поляризационного Распределенного Бриллюновского Анализа / А.С. Смирнов, А.И. Кривошеев, Ю.А. Константинов, Ф.Л. Барков, В.В. Бурдин // *Фотон Экспресс*. - 2017. - №6 - С. 183.
119. Кривошеев, А. И. Быстрое индикаторное измерение температур и деформаций методом поляризационно-бриллюэновской рефлектометрии / А. И. Кривошеев, Е.А. Носова, Ю.А. Константинов, Ф.Л. Барков, В.В. Бурдин, А.С. Смирнов // *Фотон Экспресс Наука*. – 2019. – №6 – С. 310-311.
120. Barkov, F.L., Konstantinov, Y.A., Krivosheev, A.I. A Novel Method of Spectra Processing for Brillouin Optical Time Domain Reflectometry / F.L. Barkov, Y.A. Konstantinov, A.I. Krivosheev // *Fibers*. – 2020. – №8. – P. 60.
121. Кривошеев, А.И., Барков, Ф.Л., Константинов, Ю.А. Контроль ВОЛС методом бриллюэновской рефлектометрии: проблемы и возможные решения / А.И. Кривошеев, Ф.Л. Барков, Ю.А. Константинов // *ПЕРВАЯ МИЛЯ*. – 2020. – №7-8. – С. 37-44.

122. Konstantinov, Y. Polarisation reflectometry of anisotropic optical fibres / Y. Konstantinov, I. Kryukov, V. Pervadchuk, A. Toroshin // *Quantum Electron.* – 2009. – Vol. 39. – P. 1068–1070.

123. Thévenaz, L., Nikles, M., Robert, P. High-accuracy Brillouin gain spectrum measurements of single mode fibers / L. Thévenaz, M. Nikles, P. Robert // *In Proceedings of the Symposium on Optical Fiber Measurements, Boulder, CO, USA.* – 1994. – P. 211-214.

124. Haneef, S. Performance analysis of frequency shift estimation techniques in Brillouin distributed fiber sensors / S. Haneef, Z. Yang, L. Thévenaz, D. Venkitesh, B. Srinivasan // *Opt. Express.* – 2018 – Vol. 26 – P. 14661.

125. Farahani, M.A., Castillo-Guerra, E., Colpitts, B.G. A Detailed Evaluation of the Correlation-Based Method Used for Estimation of the Brillouin Frequency Shift in BOTDA Sensors / M.A. Farahani, E. Castillo-Guerra, B.G. Colpitts // *IEEE Sensors Journal.* – 2013. – Vol. 13 – № 12. – P. 4589.

126. Cheng, F. Gain Spectrum Engineering in Distributed Brillouin Fiber Sensors / F. Cheng, L. Xin, S. Preussler, T. Schneider // *Journal of Lightwave Technology.* – 2019. – Vol. 37. – P. 5231.

127. Белокрылов, М.Е. Распределённое одноимпульсное исследование поляризационных осей анизотропных оптических волокон/ М.Е. Белокрылов, А.И. Кривошеев, Ю.А. Константинов, А.Т. Туров // "Фотон-Экспресс". – 2021. – №7. – С. 16-18.

128. 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/ М.Е. Белокрылов, Ю.А. Константинов, А.И. Кривошеев // "Фотон-Экспресс". – 2021. – №8. – С. 10-13.

129. Belokrylov, M.E. A Single-Scan PM-Fibers Polarization Axes Study / M.E. Belokrylov, Yu.A. Konstantinov, A.I. Krivosheev, A.T. Turov, K.V.

Stepanov, E.O. Garin, A.B. Pnev, A.A. Fotiadi // International Conference Laser Optics 2022. – 2022. – P. 1

130. Кривошеев, А.И., Константинов, Ю.А. Создание элементов автоматизированной системы измерения бриллюэновского сдвига оптических волокон в условиях промышленного производства / А.И. Кривошеев, Ю.А. Константинов // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2021. – № 4. – С. 37-48.

131. Смирнов, А.С. Теоретические аспекты проектирования автоматизированных исследовательских систем на принципах оптической рефлектометрии временной и частотной области / А.С. Смирнов, А.И. Кривошеев, Е.А. Носова, С.Д. Бочкова, Ф.Л. Барков, В.В. Бурдин, Ю.А. Константинов // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2018. – №4. – С. 8-13.

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

133. Кривошеев, А.И. Наблюдение «отражающих событий» на участках микроизгибных деформаций одномодового световода при помощи специальной модификации релеевского рефлектометра / А.И. Кривошеев, Е.А. Носова, И.А. Лобач, Д. Клод, Ю.А. Константинов, Ф.Л. Барков // Оптическая рефлектометрия – 2018 Тезисы II Всероссийской конференции. – 2018. – С. 30-33.

134. Смирнов, А.С. Способ корреляционной пост-обработки данных, получаемых с приборов обратного рассеяния / А.С. Смирнов, Ф.Л. Барков, Ю.А. Константинов, А.И. Кривошеев // Оптическая рефлектометрия - 2016 сборник тезисов докладов – 2016. – С. 58-59

135. Константинов, Ю.А., Кривошеев, А.И., Барков, Ф.Л. Автоматизированная система измерений для распределенного исследования бриллюэновского сдвига в РМ-волокнах в условиях производства / Ю.А.

Константинов, А.И. Кривошеев, Ф.Л. Барков // ПЕРВАЯ МИЛЯ. - 2022. - №6. – С. 78-83.

136. Barkov, F.L. Modelling of polarised optical frequency domain reflectometry of axially twisted anisotropic optical fibres / F.L. Barkov, Yu.A. Konstantinov, S.D. Bochkova, A.S. Smirnov, V.V. Burdin, A.I. Krivosheev, E.A. Nosova, O.Yu. Smetannikov // Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 49. – P. 514-517.

137. Cybenko, G.V. Approximation by superpositions of a sigmoidal function / G.V. Cybenko // Mathematics of Control, Signals and Systems. – 1989. –Vol. 2. – P. 303-314.

138. Rashid, T. Make your own neural network: a gentle journey through the mathematics of neural networks, and making your own using the Python computer language / T. Rashid. – 2016.

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

140. Krivosheev, A.I. A Neural Network Method For The BFS Extraction / A.I. Krivosheev, Yu.A. Konstantinov, V.V. Krishtop, A.T. Turov, F.L. Barkov, A.A. Zhirnov, E.O. Garin, A.B. Pnev // International Conference Laser Optics 2022. – 2022.

Приложение А
Акт внедрения результатов кандидатской(диссертационной) работы
Кривошеева Антона Ивановича (ПАО «ПНППК»)

Публичное акционерное общество
**«Пермская научно-производственная
приборостроительная компания»**
Россия, 614007, г. Пермь, ул. 25 Октября, 106
Тел.: +7 (342) 240 05 28; факс: +7 (342) 280 97 19
Приемная: +7 (342) 240 05 02
Справочная: +7 (342) 240 05 12
ИНН 5904000395, КПП 590401001
E-mail: root@pnppk.ru
www.pnppk.ru



Public Joint Stock
**«Perm Scientific-Industrial
Instrument Making Company»**
Russia, 614007, Perm, 25th October St., 106
Phone: +7 (342) 240 05 02, Fax: +7 (342) 280 97 19
E-mail: root@pnppk.ru www.pnppk.ru



№ 66/92-88-а от 28.09.2022

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор
ПАО «ПНППК»
А.Г. Андреев

«25» 09 2022 г.

внедрения (использования) результатов диссертационной работы
Кривошеева Антона Ивановича.

Настоящий акт свидетельствует о том, что разработанные в диссертации А.И. Кривошеева «Автоматизация технологического процесса измерения бриллюэновского сдвига частоты в оптических волокнах в условиях промышленного производства» практические рекомендации были использованы:

- для исследования двулучепреломления протяженных участков оптического волокна типа «Панда», что позволило повысить точность отбора волокон для производства датчиков и повысить выход годной продукции на 10 %;
- проведение измерений волоконно-оптических контуров ВОГ методом бриллюэновской рефлектометрии позволило снизить общее время технологического контроля изделия на 12 %.

Согласовано:

Зам. генерального директора по науке –
директор НТЦ – главный конструктор

А.В. Субботин