

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 53.083.91

**ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
БРИЛЛЮЭНОВСКИХ ОПТИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ ВО
ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ (ВОТДА) С ГРУБЫМ ШАГОМ
СКАНИРОВАНИЯ ПО ЧАСТОТЕ¹**

**© 2026 г. А. И. Кривошеев^{а,с,*}, Ф. Л. Барков^а, Ю. А. Константинов^а,
Н. Р. Поддубровский^б, И. А. Лобач^б**

^а *Институт механики сплошных сред*

Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения

Российской академии наук

Россия, 614013, Пермь, ул. Академика Королёва, 1

^б *Институт автоматики и электрометрии*

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

^с *Пермский национальный исследовательский политехнический университет,*

Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, д. 29

**E-mail: antokri@ya.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 10.06.2026

Принята к публикации 23.07.2026

Представлен комплексный подход к повышению дальности, точности и быстродействия распределенных волоконно-оптических датчиков на основе рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Объединены результаты двух этапов исследований: 1) разработка метода пространственного усреднения с выравниванием для обработки зашумленных спектров, измеренных с грубым шагом сканирования по частоте, 2) применение данного метода в составе бриллюэновского анализатора на основе эрбиевого самосканирующего лазера. Также изучено влияние различных факторов на эффективность метода.

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

Ключевые слова: распределенный волоконно-оптический датчик, бриллюэновский анализ, самосканирующий лазер, корреляционный метод, пространственное усреднение, обработка сигналов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределенные волоконно-оптические датчики на основе рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (РМБ) совершили революцию в области контроля состояния протяженных объектов и сложных инженерных конструкций [1, 2]. Способность использовать стандартное телекоммуникационное волокно в качестве сплошной измерительной среды, чувствительной к температуре и деформации с сантиметровым пространственным разрешением на расстояниях до сотен километров, обеспечила их широкое использование при мониторинге трубопроводов, мостов, тоннелей, а также применение в авиационной и энергетической отраслях [3, 4]. Наиболее технологически зрелой реализацией данного принципа является бриллюэновский оптический рефлектометр/анализатор во временной области (Brillouin Optical Time-Domain Reflectometer /Analyzer, BOTDR/ BOTDA) [5].

Несмотря на выдающиеся метрологические характеристики, широкое внедрение BOTDA-систем сдерживается наличием двух взаимосвязанных фундаментальных проблемам. Во-первых, это высокая аппаратная сложность и стоимость. Традиционная схема требует генерации двух высококогерентных оптических волн с точной и плавно перестраиваемой разностью частот, соответствующей бриллюэновскому сдвигу частоты (БСЧ), равному примерно 11 ГГц. Для этого применяется сложное СВЧ-оборудование (высокочастотные электрооптические модуляторы и прецизионные генераторы), что существенно увеличивает стоимость системы [6]. Во-вторых, это проблема низкого отношения сигнал/шум (SNR), что, в итоге, приводит к необходимости обработки сильно зашумленных данных. Точность определения БСЧ, являющегося информативным параметром, критически зависит от SNR и частотного разрешения измеряемого спектра усиления Бриллюэна (СУБ). С увеличением длины линии, повышением скорости измерений (что влечет за собой увеличение шага частотного сканирования) или при использовании упрощенных лазерных источников SNR на удаленных участках волокна падает, а количество отсчетов в спектре становится малым. В этих условиях классический и наиболее распространенный метод обработки – аппроксимация контуром Лоренца (АКЛ) с помощью нелинейного метода наименьших квадратов – демонстрирует резкий рост погрешности [7, 8].

В связи с этим актуальными становятся исследования по двум направлениям: разработка новых (более устойчивых) алгоритмов обработки данных и создание альтернативных (более простых и дешевых) аппаратных архитектур BOTDA. Настоящая

работа представляет собой синтез результатов, полученных в ходе последовательного исследования обоих направлений.

На первом этапе была разработана и всесторонне верифицирована новая методика обработки данных – метод пространственного усреднения с выравниванием (ПУВ), основанный на принципах двумерной корреляционной обработки изображений [9]. Его ключевая идея – использование пространственной корреляции между соседними спектрами вдоль волокна. Путем их взаимного выравнивания по максимуму и последующего когерентного усреднения удастся повысить эффективное SNR и снизить влияние грубого шага сканирования. Моделирование и эксперименты с данными коммерческого анализатора с искусственно ухудшенными характеристиками (передискретизация по частоте, снижение SNR) однозначно показали, что ПУВ обеспечивает значительный выигрыш в точности и повторяемости определения БСЧ именно в целевых неблагоприятных условиях: при SNR меньше 8 дБ и шаге сканирования больше 4 МГц.

На втором этапе решалась прикладная задача: реализация быстрого и недорогого BOTDA на основе эрбиевого волоконного самосканирующего лазера (ЭССЛ) [10]. Такие лазеры обеспечивают пассивную периодическую перестройку частоты без внешнего СВЧ-управления, что кардинально упрощает схему. Однако их штатный режим работы характеризуется как раз теми “неблагоприятными” параметрами, для борьбы с которыми и был создан метод ПУВ: фиксированным шагом сканирования (порядка 5 МГц) и при большой длине волоконной линии низким SNR. Таким образом, второй этап исследований стал не просто очередным испытанием алгоритма, а проверкой ключевой гипотезы: может ли алгоритмическая обработка методом ПУВ стать системообразующим компонентом, который компенсирует аппаратные упрощения и обеспечит новой системе конкурентоспособные характеристики? Экспериментальное исследование с варьированием оптических потерь в линии длиной 50 км подтвердило эту гипотезу, продемонстрировав, что применение ПУВ позволяет увеличить бюджет оптических потерь (БОП) системы примерно на 2 дБ, что эквивалентно потенциальному увеличению максимальной измеряемой длины примерно на 10 км.

В настоящей статье последовательно излагаются принцип метода пространственного усреднения с выравниванием; схема BOTDA на основе самосканирующего лазера; сравнительный анализ эффективности методов аппроксимации и пространственного усреднения; влияние различных факторов на эффективность ПУВ. Синергия аппаратных и алгоритмических решений открывает путь к созданию высокопроизводительных, но при этом экономичных и быстрых распределенных сенсорных систем.

2. МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННОГО УСРЕДНЕНИЯ С ВЫРАВНИВАНИЕМ (ПУВ)

Разработка метода ПУВ [9] была направлена на решение задачи точного извлечения сдвига частоты из спектра усиления Бриллюэна в условиях, когда применение классической аппроксимации контуром Лоренца становится неэффективным. К таким условиям относятся низкое отношение сигнал/шум и грубый шаг частотного сканирования, что типично для высокоскоростных измерений или работы с нестандартными источниками излучения.

Метод ПУВ основан на представлении данных BOTDA/BOTDR в виде двумерного массива (изображения), где по одной оси отложена продольная координата вдоль волокна z , по другой – частота зондирования ν , а интенсивность сигнала соответствует амплитуде СУБ (см. условную схему на рис. 1). Алгоритм предполагает, что в пределах некоторого конечного отрезка волокна форма СУБ изменяется незначительно, а изменение БСЧ носит плавный характер. Эти допущения позволяют использовать информацию от соседних пространственных точек для улучшения характеристик спектра в текущей точке.

Алгоритм обработки спектра с номером i включает следующие шаги.

1. Передискретизация (повышение частотного разрешения). Исходный СУБ, имеющий малое количество отсчетов (около 10 точек на спектр при шаге 5 МГц и ширине линии 30 МГц), интерполируется для увеличения плотности дискретизации по частоте. В простейшем случае используется линейная интерполяция между соседними точками.

2. Формирование скользящего окна обработки. Для текущего спектра $S_i(\nu)$ выбирается набор P , состоящий из N последовательных спектров $S_i, S_{i+1}, \dots, S_{i+N}$, расположенных “вперед” по волокну. Выбор оптимального N является предметом настройки метода.

3. Корреляционное выравнивание спектров. Для каждого спектра S_{i+K} из набора P вычисляется функция взаимной корреляции (ВКФ) с опорным спектром S_i . Сдвиг d_{i+K} , соответствующий максимуму ВКФ, определяет величину, на которую необходимо сместить спектр S_{i+K} по частотной оси для наилучшего совмещения его максимума с максимумом опорного спектра:

$$d_{i+K} = \max_j \sum_{-N}^N S_{i+K,j} S_{i,j-n}, \quad (1)$$

где n – аргумент ВКФ, j – индекс частотной точки. После определения сдвига все значения спектра S_{i+K} смещаются на величину d_{i+K} .

4. Усреднение выровненных спектров. Все спектры из набора P после процедуры выравнивания нормируются и суммируются с опорным спектром S_i . В результате формируется один результирующий спектр $S_i(\nu)$ с существенно повышенным эффективным SNR.

5. Окончательная обработка. К улучшенному спектру $S_i(\nu)$ применяется стандартный метод АКЛ для точного определения значения БСЧ. Таким образом, ПУВ выступает в роли мощного препроцессора, подготавливающего данные для финальной точной аппроксимации.

Логика метода проиллюстрирована на рис. 1.

Рис. 1. Принцип метода ПУВ

Блок-схема, на которой изображена основная последовательность действий в виде программного алгоритма, представлена в нашей предыдущей работе [9].

3. НАБОРЫ ДАННЫХ ДЛЯ АПРОБАЦИИ МЕТОДА

В работах [9, 11] эффективность метода исследовалась для трех наборов данных: одном модельном и двух, полученных на экспериментальных установках. В качестве метрики, характеризующей эффективность, было выбрано уменьшение усредненной ошибки извлечения БСЧ по сравнению с АКЛ.

3.1. Модельные данные

Были сгенерированы массивы СБУ, имитирующие измерение с различными шагами частотного сканирования (от 0.5 до 16 МГц) и с различными SNR в диапазоне от 2 до 12 дБ. Поскольку истинное значение БСЧ для каждого смоделированного спектра было известно, ошибка определялась как разница между определенным и истинным значениями.

3.2. Данные классического бриллюэновского анализатора

Первая экспериментальная установка (рис. 2а) была построена на базе коммерчески доступного бриллюэновского анализатора DiTeSt, выступающего в качестве референсной высокоточной системы. В данной конфигурации источником излучения служил узкополосный лазер с внешним перестраиваемым по частоте гетеродином, обеспечивающим малое разрешение по частоте (шаг примерно 1 МГц). Сформированные прямоугольные импульсы накачки длительностью 10 нс вводились в тестовое волокно SMF-28e, размещенное на разрезной катушке (т.е. исключаящее деформацию, вызванную намоткой волокна) внутри термостатирующей камеры (Espec MC-711) для стабилизации температуры на уровне 25 °С и устранения внешних тепловых воздействий.

Рис. 2. Эксперименты регистрации спектров РМБ...

СБУ снимались с шагом 1 МГц. Спектры, полученные в результате длительного накопления, принимались за эталонные, а значения БСЧ в каждой точке волокна, полученные методом АКЛ, – за истинные.

В рамках экспериментального плана эти данные подвергались последующей искусственной частотной передискретизации для моделирования работы системы с грубым шагом сканирования (2, 4, 8, 16 МГц), а также ограничению количества накоплений для снижения SNR. Таким образом, можно было изолированно изучать влияние дискретности спектра и уровня шума на точность различных алгоритмов обработки.

3.3. Данные бриллюэновского анализатора на основе самосканирующего лазера

Вторая экспериментальная установка (рис. 2б) представляла собой разработанную упрощенную схему BOTDA, центральным элементом которой являлся волоконный ЭССЛ на основе динамической решетки населенности. Его ключевая особенность – пассивная, не зависящая от внешнего управления перестройка частоты излучения с фиксированным шагом около 5.1 МГц в диапазоне около 2.4 ГГц. Это позволило полностью исключить из схемы сложное и дорогостоящее СВЧ-оборудование для перестройки частоты. Излучение ЭССЛ модулировалось в импульсы длительностью 50 нс, усиливалось и через скремблер поляризации вводилось в тестовую линию. Последняя состояла из двух катушек стандартного одномодового волокна суммарной длиной 50 км. Приемный тракт включал узкополосную ВБР для фильтрации рэлеевского рассеяния, быстродействующий фотоприемник и цифровой осциллограф.

Для вариации SNR между катушками был установлен перестраиваемый оптический аттенюатор, позволявший вносить в линию контролируемые точечные ослабления величиной 5 и 10 дБ. В данной конфигурации измерения проводились в течение 30 с, что соответствовало усреднению всего примерно 40 спектральных сканов лазера, и система изначально работала в режиме с естественно грубым частотным шагом и относительно низким SNR особенно на участках после ослабителя.

За истинное значение БСЧ в каждой точке волокна выбиралось получаемое методом АКЛ при обработке спектра, снятого в отсутствие аттенюатора.

Таким образом, основное методологическое различие между двумя установками заключается в последовательности и природе формирования “сложных” данных. В первом случае высококачественный сигнал искусственно ухудшался на этапе постобработки. Во втором случае сигнал с характеристиками, представляющими интерес для высокоскоростных и упрощенных систем, формировался непосредственно в процессе измерения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 представлена разница в погрешности определения БСЧ методами ПУВ и АКЛ в зависимости от SNR для шага сканирования 5.1 МГц. Строго говоря, данные для шага 5.1

МГц имеются только для третьего набора данных (установка с ЭССЛ). Однако из работы [7] известно, что ошибка определения БСЧ в целом пропорциональна корню из ширины спектра и пропорциональна корню из шага сканирования. Такую же зависимость должна иметь и разница погрешностей, полученных двумя методами (поскольку каждая из погрешностей имеет такой вид). Поэтому для набора модельных данных и для набора данных с первой экспериментальной установки выбирались данные для шага сканирования, равного 6 МГц, и приводились к шагу 5.1 МГц (а также к ширине спектра, соответствующей спектрам со второй установки).

В области высоких SNR выигрыш отрицательный (т. е. АКЛ более точно определяет БСЧ), однако начиная примерно со значения 5 дБ кривые переходят в положительную полуплоскость, и чем ниже SNR, тем больше выигрыш. Это ожидаемый результат – ПУВ позволяет за счет накопления повысить SNR (и тем самым расширить диапазон устойчивости влево по оси абсцисс в область меньших SNR). В то же время краевые эффекты при сдвиге спектров относительно друг друга искажают форму спектра (вносят асимметрию), что приводит к негативному результату, когда исходный спектр и так хороший (имеет высокое SNR) [11].

Рис. 3. Зависимость выигрыша в ошибке определения БСЧ от SNR для трех наборов

Следует сказать, что в работах [9, 12] отмечалось преимущество ПУВ в области низких SNR, но между собой результаты не сравнивались. В то же время рис. 3 демонстрирует наглядное различие – для набора данных с первой экспериментальной установки выигрыш в несколько раз выше. Этот результат требует дополнительного исследования.

Нами было выдвинуто три гипотезы о факторах, могущих влиять на эффективность метода.

1. Метод получения спектра. Если для модельных данных и для данных со второй установки шаг сканирования был естественным, то данные с первой установки подвергались искусственной передискретизации. Возможно, это влияет на распределение итоговых шумов в спектре.
2. Смещение БСЧ от середины сканируемого диапазона. Чем дальше от центра диапазона находится бриллюэновский пик, тем большее влияние могут иметь краевые эффекты от излома спектра при сдвиге.
3. Форма спектра. Модельные спектры имели строго лоренцеву форму полезного сигнала. Полезный сигнал в экспериментальных спектрах зачастую представляет собой распределение Фойгта, т.е. имеет примесь гауссовой компоненты.

Для проверки первой гипотезы был дополнительно проведен эксперимент на первой установке, в котором вместо передискретизации был выставлен грубый шаг сканирования. Результаты представлены на рис. 4

Рис. 4. Зависимость выигрыша в ошибке определения БСЧ от SNR для данных с

Результаты идеально совпали с данными с первой установки с передискретизацией. Таким образом, первая гипотеза не подтвердилась.

Для проверки второй гипотезы мы построили гистограммы положения БСЧ (рис. 5)

Рис. 5. Распределение вероятности БСЧ по частоте для разных наборов данных

Если для модельных данных это распределение по сути задавалось искусственно (и было выбрано равновероятным; отклонение реальной кривой от прямоугольника – это чисто статистическая погрешность), то для экспериментальных данных оно определяется исключительно оптическим волокном (как маркой, так и условиями, в которых волокно находится). Поэтому для трех экспериментов получились разные гистограммы.

Корреляция между формой гистограммы и эффективностью ПУВ, согласно рис. 5, отсутствует. Наименьшая эффективность получилась на самой размытой (модельные данные) и третьей по степени размытости (данные со второй установки) гистограммах. В то же время наиболее близкая к модельным данным гистограмма (данные с первой установки без передискретизации) соответствует высокой эффективности ПУВ. Вторая гипотеза также не подтвердилась.

Наконец, третья гипотеза представляется наиболее вероятной. Ошибка извлечения БСЧ с помощью АКЛ, очевидно, растет при отклонении формы спектра от лоренцевой. На данных, где спектры изначально лоренцевские (модельные и данные со второй установки), ПУВ демонстрирует меньшую эффективность. Конечно, стопроцентно это утверждать пока рано, гипотеза нуждается в дополнительной экспериментальной проверке.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты приводят к выводу о трансформации роли алгоритма обработки в архитектуре распределенных волоконно-оптических датчиков. Алгоритм перестает быть вспомогательным инструментом постобработки и становится ключевым лимитирующим компонентом, определяющим предельные системные характеристики. Бюджет потерь, а следовательно, и дальность действия системы, оказывается в значительной степени “алгоритмическим”. Это открывает путь к новой парадигме проектирования, а именно “аппаратная простота + алгоритмическая компенсация”. В рамках этой парадигмы можно сознательно допускать определенные упрощения в аналоговом тракте (например, использовать лазеры с фиксированным или грубым шагом сканирования, снижать

требования к мощности или времени накопления), перекладывая задачу борьбы с шумом и дискретностью на интеллектуальный цифровой обработчик. Такая стратегия позволяет создавать экономичные, быстрые и компактные системы, не жертвуя при этом основными метрологическими показателями.

Однако выявлены и ограничения метода ПУВ, которые задают направления для будущих исследований. Краевые эффекты, возникающие при сдвиге спектров и приводящие к искажению формы СУБ, обуславливают неэффективность ПУВ при высоком исходном SNR, а также требуют тщательного подбора оптимального размера окна усреднения ($N \approx 16-48$). Высокая вычислительная сложность алгоритма, связанная с многократным расчетом корреляционных функций и операциями сдвига больших массивов, в текущей реализации ограничивает его применение режимом постобработки. Устранение этих недостатков видится в интеграции методов искусственного интеллекта в процесс обработки данных Brillouin-рефлектометрии. Перспективным представляется гибридный подход, в котором корреляционные методы и нейронные сети используются не как конкурирующие, а как взаимодополняющие технологии. Например, можно рассмотреть архитектуру, где на вход сверточной нейронной сети подается двумерный массив данных СУБ. Этот массив может быть предварительно упорядочен и выровнен с помощью быстрого корреляционного метода (упрощенный ПУВ), что резко сократит пространство признаков, которые сеть должна научиться распознавать. Альтернативно или дополнительно на один из скрытых слоев той же сверточной сети может подаваться результат первичной обработки методом АКЛ – оценка центральной частоты и ширины линии. Это обеспечит сети “подсказку” в виде физически осмысленных параметров, что должно повысить точность и устойчивость обучения, особенно в области высоких SNR, где АКЛ работает отлично, а ПУВ – хуже. Такая гибридная система потенциально сможет сочетать помехоустойчивость корреляционных методов на низких SNR, точность АКЛ на высоких SNR и способность нейронных сетей к обобщению и работе с неполными данными. Это позволит создать универсальный адаптивный алгоритм, не требующий ручного выбора метода в зависимости от условий измерения.

Таким образом, синтез метода ПУВ и БА на ЭССЛ является наглядной демонстрацией перехода к эре “алгоритмически усиленных” сенсоров. В таких системах граница между измерительным прибором и алгоритмом его обработки стирается, а сам алгоритм становится стратегическим ресурсом, определяющим функциональность, производительность и экономическую эффективность всего измерительного комплекса. Дальнейшее развитие этого направления лежит на пути сближения физического моделирования РМБ-процессов,

аппаратной оптимизации и современных методов машинного обучения для создания нового класса интеллектуальных распределенных волоконно-оптических датчиков.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И БУДУЩИЕ РАБОТЫ

Проведенное исследование, интегрирующее метод пространственного усреднения с выравниванием в архитектуру бриллюэновского анализатора на основе самосканирующего лазера, позволило получить новые результаты, имеющие значение как для прикладной волоконно-оптической сенсорики, так и для методологии разработки алгоритмов обработки распределенных измерений. Экспериментальная верификация метода ПУВ на первом этапе, проведенная на данных классического бриллюэновского анализатора, однозначно продемонстрировала его эффективность в условиях, где аппроксимация контуром Лоренца дает неудовлетворительную точность, – при отношении сигнал/шум ниже 8 дБ и шаге сканирования свыше 4 МГц для спектра с полушириной 40 МГц.

Критически важным, однако, стал второй этап, в ходе которого метод ПУВ был испытан в составе реальной упрощенной аппаратной платформы на ЭССЛ. Метод ПУВ подтвердил свою ключевую роль в составе новой системы. Продemonстрированный выигрыш в суммарных потерях в оптической линии (примерно 2 дБ), который эквивалентен увеличению расчетной дальности действия с 88 до 96 км [12], является прямым следствием его способности обеспечивать более плавную деградацию точности при падении уровня сигнала по сравнению с АКЛ. Этот результат служит практическим доказательством состоятельности парадигмы “аппаратная простота + алгоритмическая компенсация”, где алгоритм перестает быть вспомогательным инструментом и превращается в системообразующий компонент, непосредственно определяющий предельные эксплуатационные характеристики, а именно дальность и помехоустойчивость. Выявленные ограничения метода, такие как чувствительность к краевым эффектам и высокая вычислительная сложность, а также значительная зависимость абсолютной эффективности от природы входных данных, задают четкие направления для будущих исследований. Наиболее перспективным путем представляется разработка гибридных интеллектуальных архитектур, сочетающих детерминированные методы (корреляция, АКЛ) и модели машинного обучения. Создание алгоритма, способного адаптироваться к различным статистикам шума и эффективно работать с данными как искусственной, так и априорной дискретизации, является следующей важной задачей. Реализация подобных решений на встраиваемых платформах позволит создать новый класс компактных быстрых и интеллектуальных распределенных сенсоров, что откроет возможности для их широкого применения в системах мониторинга протяженных и ответственных объектов в реальном

времени. Таким образом, представленная работа не только предлагает конкретное техническое решение для увеличения дальности BOTDA-систем, но и вносит вклад в формирование более строгой методологии оценки алгоритмов обработки, подчеркивая необходимость их тестирования в условиях, максимально приближенных к реальному целевому применению.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Результаты разд.1 выполнены в рамках проектов НИЧ ПНИПУ; разд 2, 5 – в рамках государственного задания Института механики сплошных сред Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (№124020600009-2); разд. 3, 4 – в рамках государственного задания Института автоматизации и электротехники СО РАН (№125022002714-2) с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Спектроскопия и оптика” ИАиЭ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hartog A.H.* An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. Boca Raton: CRC Press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315119014>.
2. *Bao X., Chen L.* Sensors. 2011. Vol. 11. № 4. P. 4152. <https://doi.org/10.3390/s110404152>.
3. *Di Sante R.* / Sensors. 2015. V. 15. № 8. P. 18666. <https://doi.org/10.3390/s150818666>.
4. *Soga K., Luo L.* J. Struct. Integrity Maint. 2018. V. 3. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1080/24705314.2018.1426138>.
5. *Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M.* Opt. Lett. 1990. V. 15. № 18. P. 1038. <https://doi.org/10.1364/OL.15.001038>.
6. *Фотиади А.А., Коробко Д.А., Золотовский И.О.* Автометрия. 2023. Т. 59. № 1. С. 74. <https://doi.org/10.15372/aut20230108>.
7. *Soto M.A., Thévenaz L.* Opt. Express. 2013. V. 21. № 25. P. 31347. <https://doi.org/10.1364/oe.21.031347>.
8. *Li W., Zhou L., Liu W. et al.* IEEE Sens. J. 2022. V. 22. № 19. P. 18501. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3200989>.
9. *Konstantinov Y., Krivosheev A., Barkov F.* Algorithms. 2024. V. 17. № 8. P. 365. <https://doi.org/10.3390/A17080365>.
10. *Podubrovskii N.R., Lobach I.A., Kablukov S.I.* Opt. Lett. 2024. V. 49. № 2. P. 282. <https://doi.org/10.1364/OL.511861>.
11. *Barkov F.L., Krivosheev A.I., Konstantinov Y.A., Davydov A.R.* Fibers. 2023. V. 11. № 6. P. 51. <https://doi.org/10.3390/fib11060051>

12. *Кривошеев А.И., Барков Ф.Л., Константинов Ю.А., Поддубровский Н.Р., Лобач И.А.* Автометрия. 2025. Т. 61. № 5. С. 93. <https://doi.org/10.15372/AUT20250511> .

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Принцип метода ПУВ

Рис. 2. Эксперименты регистрации спектров РМБ: **а** – с использованием коммерческого анализатора DiTeSt STA-R202, **б** – с использованием экспериментального образца анализатора на базе ЭССЛ

Рис. 3. Зависимость выигрыша в ошибке определения бриллюэновского сдвига частоты от отношения сигнал/шум для трех наборов данных. Выигрыш приведен к шагу сканирования 5.1 МГц.

Рис. 4. Зависимость выигрыша в ошибке определения бриллюэновского сдвига частоты от отношения сигнал/шум для данных с первой установки с грубым шагом сканирования. Выигрыш приведен к шагу сканирования 5.1 МГц

Рис. 5. Распределение вероятности БСЧ по частоте для разных наборов данных

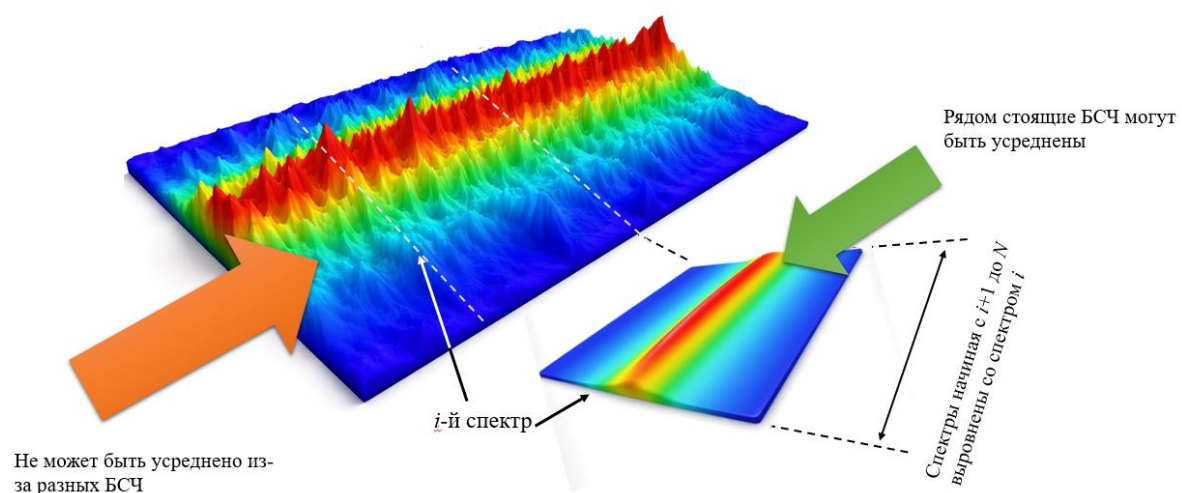


Рис. 1.

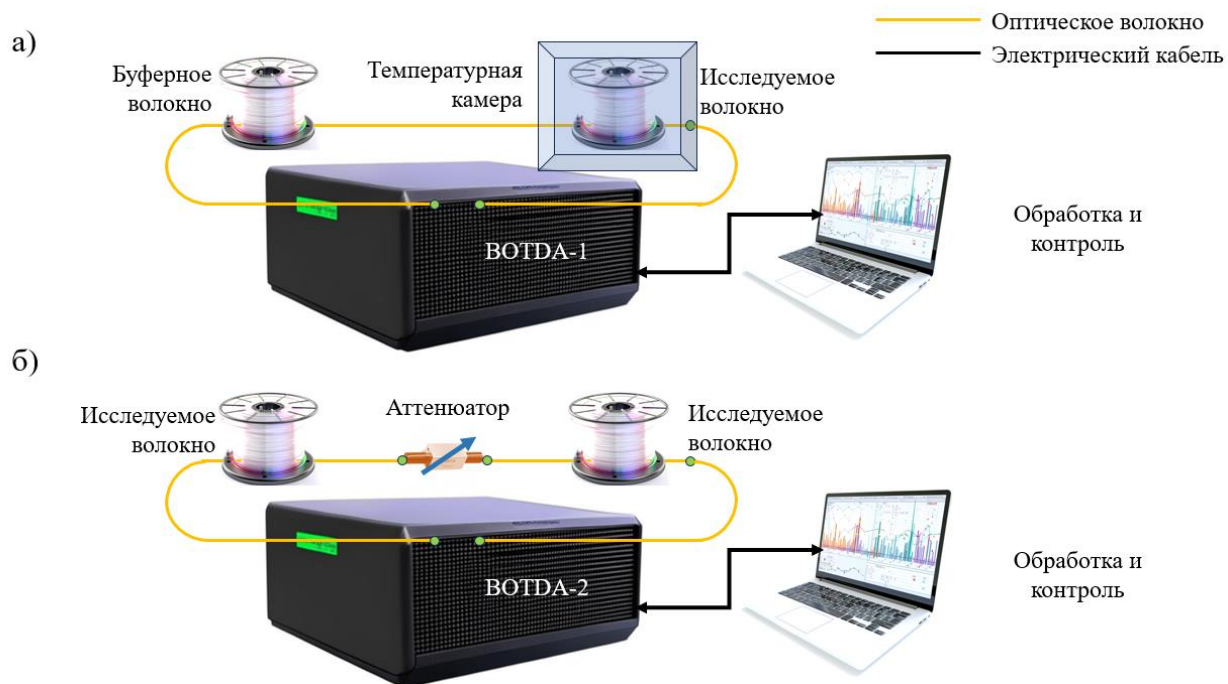


Рис. 2.

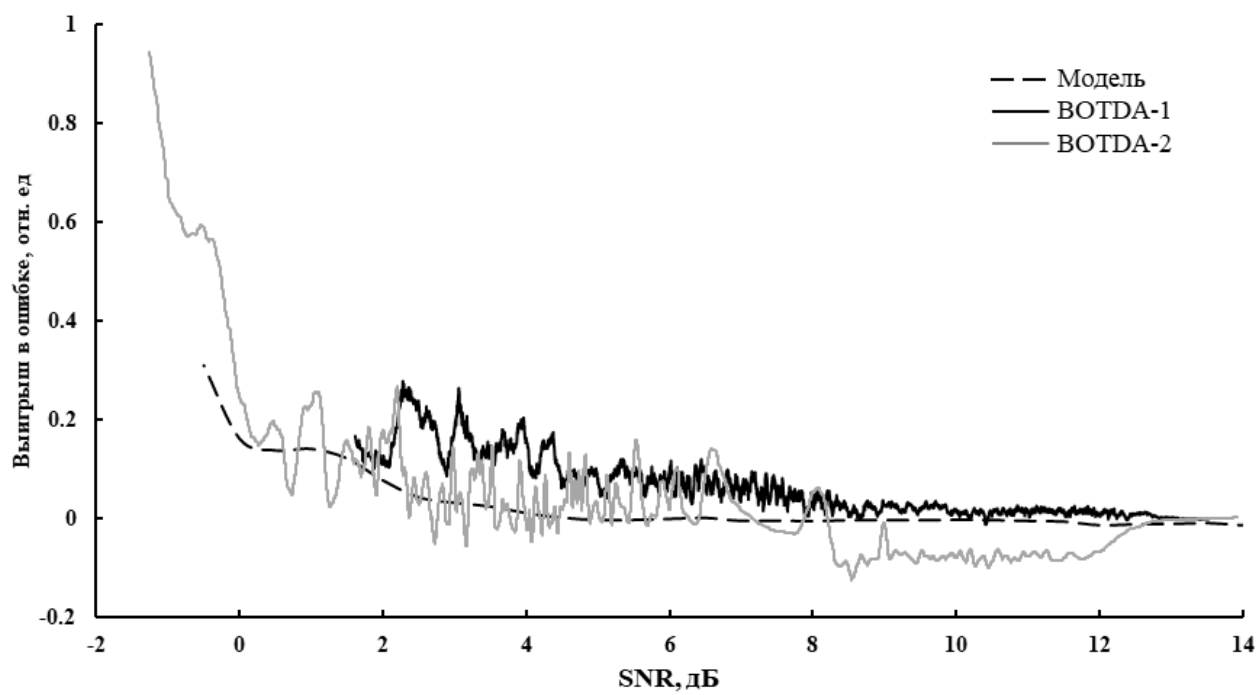


Рис. 3.

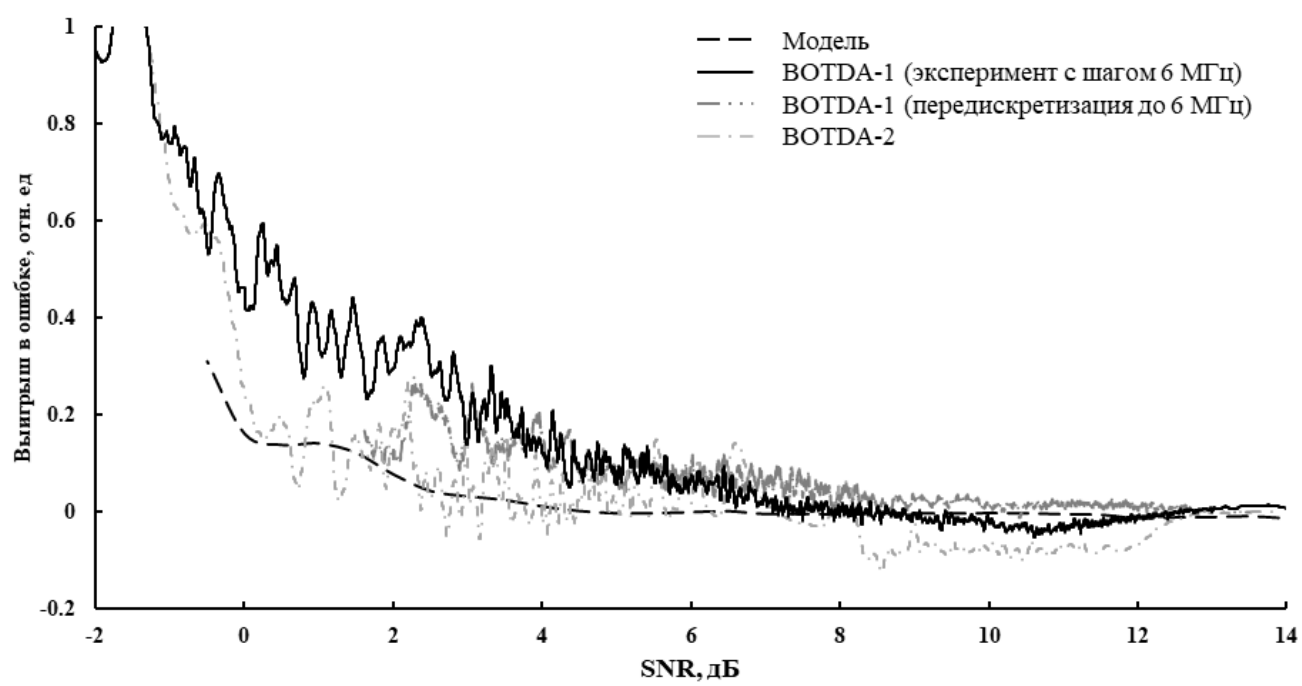


Рис. 4.

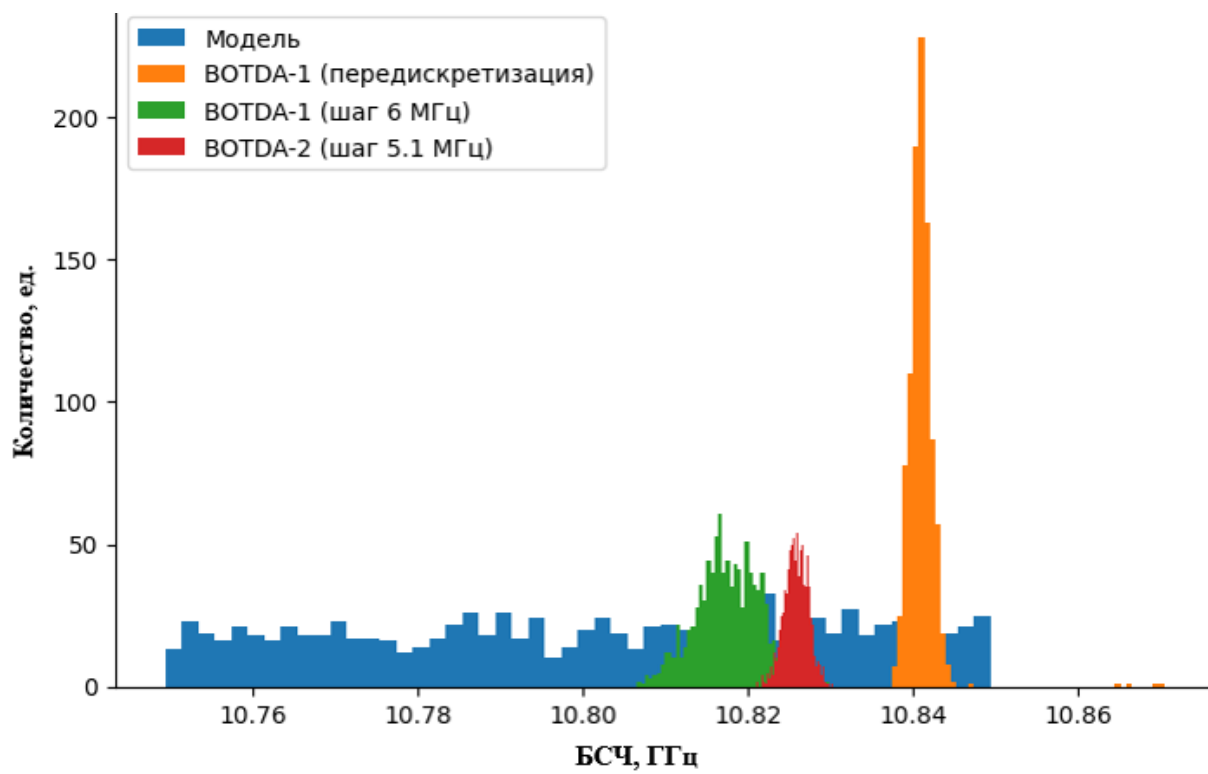


Рис. 5.