

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.787

ДИСТАНЦИОННАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ УДАЛЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОМОЩИ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ
ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ,
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ¹

© 2026 г. Д. А. Камбур^а, Г. Д. Мамыкин^{б, *}, А. С. Шестаков^а,
Ю. А. Константинов^а, Е. Е. Тотмина^{а, б}

^аИнститут механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук —
филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской
академии наук

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

^бПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский просп., 29

*E-mail: mamyckin.gennady@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Оптическая рефлектометрия частотной области (OFDR) — метод распределенной сенсорики и метрологии с субмиллиметровым разрешением, традиционно применяемый для измерений в волоконно-оптических линиях. Перенос излучения в свободное пространство открывает перспективы для прецизионной дальнометрии, навигации и верификации алгоритмов слежения. Однако на этом пути возникает ограничение: хроматическая дисперсия приводит к размытию отклика от удаленной мишени, снижая разрешение на порядки ниже теоретического. В работе представлены три серии экспериментов, в каждой из которых оценивается возможность преодоления этого ограничения. В идеальных условиях — перпендикулярное падение луча на плоскую мишень — компенсация дисперсии позволяет восстановить расчетное разрешение. При усложнении геометрии (наклонные поверхности, движение объекта, текстурированные и спектрально неоднородные мишени) одного лишь устранения дисперсионных искажений оказывается недостаточно: возникают дополнительные факторы, не поддающиеся аналитической компенсации. При этом рефлектограммы различных типов отражателей демонстрируют устойчивые индивидуальные паттерны. Это обосновывает переход от аналитического извлечения параметров к подходу, основанному на накоплении данных и применении методов машинного обучения для классификации объектов по их интерференционным портретам. Результаты работы определяют границы применимости OFDR в свободном пространстве и намечают пути их расширения.

Ключевые слова: оптическая рефлектометрия частотной области, свободно-пространственная дальнометрия, хроматическая дисперсия, компенсация дисперсии, OFDR, прецизионные измерения, трекинг головы, зондирование поверхностей.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерные дальнометры нашли широкое применение в промышленности, строительстве, навигации мобильных роботов и в системах технического зрения. В большинстве случаев они работают на принципе время-пролетной дальнометрии (Time-of-Flight, ToF), фазовых измерений или лазерной триангуляции [1–3]. Общим для этих методов является то, что выходной сигнал представляет собой одно число — расстояние до ближайшей преграды. При регистрации изменений расстояния во времени такие устройства могут выполнять функцию удаленных виброметров. Однако информация о свойствах самой поверхности (материал, шероховатость, наличие подповерхностных структур) при таком подходе не извлекается.

Между тем существует ряд задач, в которых одного расстояния недостаточно. В автономной навигации мобильных роботов важно различать типы покрытий: твердое основание, рыхлый грунт, водную поверхность [4, 5]. В промышленной инспекции требуется не только обнаружить объект, но и идентифицировать материал, выявить загрязнения или дефекты поверхности [6, 7]. В медицинской диагностике, особенно в эндоскопии и дерматологии, востребованы бесконтактные методы анализа тканей *in situ* [8, 9]. Оптические методы рефлектометрии биотканей, включая поляризационную и когерентную рефлектометрию, показали чувствительность к морфологии и функциональному состоянию тканей [10].

Импульсные рефлектометрические методы, основанные на измерении времени пролета коротких световых импульсов, принципиально ограничены в пространственном разрешении длительностью импульса и полосой пропускания регистрирующей электроники. Достижение субмиллиметрового разрешения на дистанциях более метра требует использования импульсов длительностью в единицы пикосекунд и соответствующей высокоскоростной электроники, что усложняет и удорожает систему [11].

Альтернативой выступает оптическая рефлектометрия частотной области (OFDR). В этом методе пространственное разрешение определяется диапазоном перестройки частоты зондирующего излучения, а не длительностью импульса. В классическом варианте OFDR применяется для распределенных измерений в волоконно-оптических линиях, где сигнал формируется обратным рэлеевским рассеянием или отражениями от дискретных неоднородностей внутри волокна [12, 13]. В работе [14] этот принцип был адаптирован для детектирования осаждения угольной пыли на поверхность волокна без сердцевины, что демонстрирует чувствительность OFDR к внешним воздействиям, изменяющим условия распространения света вблизи границы раздела.

Перенос OFDR в свободное пространство (когда зондирующий луч выводится из волокна через коллиматор, распространяется в воздухе, отражается от внешней мишени и возвращается обратно) позволяет объединить высокое разрешение OFDR с гибкостью

бесконтактного измерения. Однако здесь возникает ограничение, не проявляющееся в волоконных измерениях: хроматическая дисперсия. При сканировании частоты лазера эффективная оптическая длина пути до мишени оказывается зависящей от частоты из-за дисперсии в воздухе и в оптических элементах коллимирующей системы. В результате отклик от одиночной отражающей поверхности в рефлектограмме размывается, и реальное разрешение падает на порядки ниже теоретического.

В настоящей работе на основе трех экспериментальных серий выявлены ограничения, накладываемые дисперсионным уширением. Для конфигурации с перпендикулярным отражением от уголкового отражателя на прецизионном рельсе предложен и экспериментально реализован метод численной компенсации дисперсии, позволяющий восстановить теоретическое разрешение системы. Для двух других конфигураций — трекинга головы человека (актуального для верификации алгоритмов видео-импульсного теста vHIT [15, 16]) и анализа текстурных поверхностей — показано, что компенсация дисперсии является необходимым условием для достижения требуемых характеристик, и соответствующие эксперименты намечены как перспективные направления продолжения работы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (рис. 1) подробно описана в работе [17]. OFDR-система включала перестраиваемый лазер TSL-570 (Santec) с диапазоном перестройки 1480–1640 нм, два интерферометра: основной (Маха–Цендера) с измерительным плечом, выведенным в свободное пространство, и вспомогательный (Майкельсона) для формирования равномерной частотной развертки. Длительность одного сканирования составляла 1.5 с. Сигналы с фотодетекторов (HSA-S-200M, FEMTO) оцифровывались 16-битным АЦП (PCIE-1840L, Advantech) с частотой 25 МГц.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Зондирующее излучение выводилось через волоконный коллиматор (диаметр выходного пучка 1.0 мм). В зависимости от серии экспериментов в качестве мишени использовались:

- уголкового отражателя, установленный на каретке, перемещавшейся по прецизионному рельсу длиной 2 м;
- неподвижный экран напротив коллиматора, закрепленного на голове человека;
- образцы наждачной бумаги с различной зернистостью (P80–P5000), закрепленные на мишени перпендикулярно оптической оси.

Все измерения проводились в контролируемых лабораторных условиях (температура 24.3 ± 0.1 °C, давление 742 мм рт. ст., влажность 52%).

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

3.1. Эксперимент 1. Прецизионный рельс с уголковым отражателем

В первой серии измерений использовался прецизионный рельс, на котором фиксировался уголкового отражатель. Расстояние до мишени варьировалось от 0.5 до 2 м. Рефлектограммы демонстрировали ожидаемый отклик, однако форма пика, соответствующего отражению от уголкового отражателя, была существенно расширена: его ширина Π_1 составляла несколько миллиметров вместо расчетных 0.2 мм (рис. 2).

Рис. 2. Юстировка коллиматора, крепление отражателя и искажение пика отражения

Положение максимума пика хорошо коррелировало с перемещением мишени, что позволяло использовать систему как дальномер, но для задач, требующих высокого разрешения (например, разделения двух близко расположенных объектов), такое размытие делало метод неприменимым.

3.2. Эксперимент 2. Коллиматор на голове человека (трекинг движений)

Вторая серия экспериментов была посвящена задаче, имеющей важное прикладное значение: высокоточному трекингу угловых перемещений головы робота или человека. В случае с роботом такие задачи появляются во время пространственной ориентации машинным зрением, а скорость передачи данных и качество сигнала являются определяющими (рис. 3).

Рис. 3. Интеграция волоконного коллиматора в голову антропоморфного робота

В эксперименте по движению головы человека такие измерения необходимы для верификации алгоритмов машинного зрения, используемых в медицинской диагностике, в частности, при проведении видео-импульсного теста (vНІТ), который позволяет оценить вестибуло-окулярный рефлекс у пациентов с головокружениями [15, 16]. В работе [18] показано, что для корректной интерпретации vНІТ-теста требуется высокая точность синхронизации данных о движении головы и глаз; при этом коммерческие системы на основе инерциальных датчиков имеют ограничения по дрейфу, а оптические системы на основе маркеров требуют сложной калибровки.

В нашем эксперименте коллиматор закреплялся на голове человека, а мишенью служил экран, установленный на фиксированном расстоянии. При повороте головы изменялось расстояние от коллиматора до экрана, и по этим изменениям вычислялся угол поворота. Такой подход позволяет получить независимую эталонную траекторию, не подверженную дрейфу, для последующего сравнения с данными, получаемыми из видеопотока [18].

Эксперимент показал, что рассчитанные углы хорошо согласуются с реальными при плавных движениях, однако при резких поворотах или при попытке достичь углового разрешения менее одного градуса флуктуации положения пика, обусловленные его размытием, становились сопоставимы с измеряемым сигналом. Следовательно, для достижения требуемой точности (угловое разрешение порядка десятых долей градуса) метод нуждался в устранении источника уширения.

3.3. Эксперимент 3. Образцы наждачной бумаги (чувствительность к текстуре)

В третьей серии экспериментов была предпринята попытка исследовать чувствительность метода к свойствам поверхности. На мишени закреплялись образцы наждачной бумаги с различной зернистостью: от P80 до P5000 (рис. 4). Ожидалось, что более крупные зерна будут давать более сильное обратное рассеяние, а возможно, и формировать несколько пиков, соответствующих отражениям от отдельных зерен. Такая возможность представляла бы интерес для задач бесконтактной классификации материалов и оценки шероховатости [19, 20].

Рис. 4. Образцы наждачной бумаги

Однако рефлектограммы для всех образцов оказались практически идентичными: единичный размытый пик, положение которого определялось расстоянием до подложки, на фоне которого не удавалось выделить признаки структуры поверхности. Размер пятна на мишени составлял около 1 мм, что значительно превышало размер зерен, но и пространственное разрешение системы по расчетам должно было позволять различать детали на порядок меньшие. Тот факт, что разница между образцами не проявилась, указывал на то, что доминирующим фактором, ограничивающим разрешение, является не геометрия пятна и не параметры регистрации, а сам процесс формирования OFDR-сигнала.

Предположительно, причина, объединяющая неудачи всех трех серий экспериментов, — хроматическая дисперсия. В волоконных измерениях OFDR опорное и измерительное плечи интерферометра проходят через одинаковые типы волокна, и дисперсия компенсируется автоматически [12]. В свободно-пространственной конфигурации измерительный луч проходит через воздух, коллиматор и отражается от мишени, тогда как опорный сигнал остается внутри волокна. Дисперсия в воздухе (хотя и малая [21]) в сочетании с дисперсией оптических компонентов коллимирующей системы приводит к тому, что разность фаз между опорным и измерительным сигналами становится нелинейной функцией частоты. Преобразование Фурье, которое в идеальном случае дает отклик в виде узкого пика, в присутствии такой нелинейности порождает размытое распределение [22].

Задачей нашего исследования становится оценка возможностей применения метода компенсации хроматической дисперсии, предложенного нами ранее, для различных задач, появляющихся при воздушных измерениях оптическим рефлектометром частотной области. Мы должны оценить, насколько компенсация хроматической дисперсии эффективна для трех основных задач: высокоточное измерение расстояния до перпендикулярной мишени; измерение расстояния до мишени, находящейся под случайным углом (поворот головы робота или человека) и классификация объекта по свойствам его поверхности (измерение параметров наждачной бумаги). Однако сначала кратко опишем методику компенсации хроматической дисперсии, которую мы планируем применить ко всем трем типам данных.

4. МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ

Метод компенсации, детально описанный в [17], основан на использовании эталонного отражения от мишени, расположенной на известном расстоянии. Алгоритм включает следующие этапы.

1. Регистрация интерференционного сигнала для эталонной мишени. В наших экспериментах в качестве эталона использовался уголкового отражатель на расстоянии 1.5 м.

2. Применение равночастотной передискретизации к данным вспомогательного интерферометра (Equal Frequency Resampling, EFR) для компенсации нелинейности перестройки источника и хроматической дисперсии волокна в линии.

3. Вычисление БПФ (получение рефлектограммы) для определения начала воздушного участка в линии, для которого требуется компенсация. Данный участок начинается сразу после пика отражения от торца линзы коллиматора, хорошо заметного на рефлектограмме.

4. Умножение сигнала из п. 2 на комплексную экспоненту, полученную из информации о расстоянии до воздушного участка из п. 3 и смещающую частоты таким образом, чтобы начало воздушного участка оказалось в начале частотного диапазона.

5. Выделение мгновенной фазы комплексного сигнала эталона.

6. Сравнение реальной фазы с идеальной линейной фазой, которая соответствовала бы тому же расстоянию при отсутствии дисперсии. Разность дает функцию дисперсионных искажений.

7. Аппроксимация полученной функции полиномом (в данном случае — третьей степени), что позволяет сгладить шумовые флуктуации и использовать полученную функцию для последующей компенсации.

8. Для сигнала, требующего компенсации, предварительно выполняются действия из пп. 2–4. Далее выполняется привязка сигнала к неравномерной сетке фазы, полученной с помощью

аппроксимирующей функции из п. 7, и передискретизация на равномерной сетке с помощью кубического сплайна.

Поскольку данный метод не является фазовой коррекцией, то он работает не только для дистанций, близких к эталонной, на которой выполнялась калибровка, но и для всех других, не превышающих ее.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЕНСАЦИИ ДИСПЕРСИИ

Сначала рассмотрим первый эксперимент, включающий в себя также восстановление пространственного разрешения на прецизионном рельсе. На рис. 5 показана рефлектограмма, полученная для расстояния 1.84 м после компенсации. После применения компенсации ширина пика восстанавливается до теоретического значения ~ 0.2 мм и остается практически постоянной во всем диапазоне измерений. Для количественной оценки точности измерений расстояния проводилась калибровка системы [17]. Зависимость изменения частоты пика от перемещения отражателя, измеренного независимым интерферометрическим методом счета полос, оказалась линейной. Максимальное отклонение от линейной аппроксимации составило 2 мкм.

Рис. 5. Восстановление формы и позиции пика отражения

Таким образом, для конфигурации с перпендикулярным отражением от углового отражателя эффективность компенсации дисперсии подтверждена экспериментально.

Для эксперимента с коллиматором, закрепленным на голове, компенсация хроматической дисперсии оказалась не определяющим фактором в плане точности измерения угла. Пятно, отраженное от поверхности под углом, образовывало дополнительные оптические пути в воздухе, которые в итоге привели к размыванию пика отражения, и собрать их обратно через компенсацию хроматической дисперсии не получилось. Кроме этого, дрожание головы работа или человека, перемещающегося в пространстве, — дополнительный искажающий фактор, что и определяет точность в этих применениях.

Отражения от образцов наждачной бумаги после компенсации хроматической дисперсии также не видоизменились. Каждая картина обратного отражения выглядела особенно, но корреляции с зернистостью образцов наждачной бумаги выявлено не было (рис. 6).

Рис. 6. Паттерны отражений от образцов наждачной бумаги

Предполагается, что играла роль, во-первых, не всегда ровная поверхность отражателя, что привело к угловым рассогласованиям, подобным тем, что были выявлены во втором эксперименте. Во-вторых, образцы наждачной бумаги имели разный цвет, и отражение от слоев разных красок тоже могло различаться.

Таким образом, мы можем судить одновременно о двух вещах: о работоспособности метода при компенсации хроматической дисперсии во время измерения отражений до мишени, плоскость которой перпендикулярна оптической оси коллиматора; и, с другой стороны, о физических ограничениях, характерных для данного метода в существующей его версии. Мы отчетливо видим различия интерференционных паттернов, образованных отражателями различных типов, но не можем связать с ними какие-либо параметры образцов. В этом случае целесообразно накапливать статистику и осуществлять обучение глубоких нейронных сетей для автоматической классификации параметров.

6. ОБСУЖДЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Проведенные исследования позволили не только подтвердить работоспособность метода компенсации хроматической дисперсии в свободно-пространственной конфигурации OFDR, но и выявить физические границы его применимости в условиях, приближенных к реальным задачам. В базовой конфигурации (с перпендикулярным падением луча на угловой отражатель, установленный на прецизионном рельсе) метод продемонстрировал свою эффективность в полной мере. Компенсация дисперсии позволила восстановить теоретическое разрешение системы до 0.2 мм, а точность определения расстояния после калибровки составила 2 мкм. Этот результат подтверждает, что в идеальных условиях (строго перпендикулярное отражение, неподвижная мишень, малые угловые рассогласования) OFDR может служить высокоточным инструментом для прецизионной дальнометрии.

Однако при переходе к конфигурациям, имитирующим реальные сценарии использования, обнаружились ограничения, которые не могут быть устранены одной лишь компенсацией хроматической дисперсии. В эксперименте с коллиматором, закрепленным на голове человека, компенсация дисперсии не привела к ожидаемому повышению точности измерения угла. Причина заключается в том, что отражение от стены происходит не под прямым углом: поверхность не является идеальным зеркалом, и даже малые отклонения от перпендикуляра порождают множество дополнительных оптических путей в воздухе. Эти пути формируют сложную интерференционную картину, которая не сводится к одиночному пику, а представляет собой суперпозицию множества откликов. Хроматическая дисперсия вносит свой вклад в уширение каждого из этих откликов, но даже после ее компенсации суперпозиция остается, и восстановить единый узкий пик невозможно. Кроме того, в реальных условиях неизбежны микродрожания головы (как у человека, так и у роботизированной платформы), которые дополнительно усредняют сигнал и ограничивают достижимое угловое разрешение. Таким образом, для задач трекинга движений определяющими факторами становятся не столько хроматические искажения, сколько геометрия рассеяния и динамика объекта.

В эксперименте с образцами наждачной бумаги различной зернистости также не удалось установить корреляцию между параметрами рефлектограммы после компенсации и размером зерен. При этом важно отметить, что каждая рефлектограмма имела индивидуальный, неповторимый вид: форма пика, наличие дополнительных выбросов, характер затухания отличались от образца к образцу, но эти отличия не обнаруживали систематической связи с зернистостью. Выявлено два фактора, которые, вероятно, вносят основной вклад в наблюдаемое разнообразие. Первый фактор — угловые рассогласования, аналогичные тем, что проявились в эксперименте с поворотом плоскости отражения. Образцы наждачной бумаги не являются идеально плоскими; их поверхность имеет собственный рельеф, который приводит к отклонению отраженного луча от перпендикуляра. Как и в случае с коллиматором на голове, это порождает множество оптических путей и усложняет интерференционную картину. Второй фактор — различие в цвете (спектральных характеристиках) образцов. Наждачная бумага разных марок имеет не только разный размер зерна, но и разный цвет связующего и абразивного материала. Поскольку OFDR использует перестройку частоты в широком диапазоне (1480–1640 нм), спектральная зависимость коэффициента отражения от материала может вносить дополнительный вклад в форму рефлектограммы, маскируя чисто геометрические эффекты, связанные с шероховатостью.

Таким образом, проведенные эксперименты позволяют сделать два взаимодополняющих вывода. С одной стороны, метод компенсации хроматической дисперсии успешно решает задачу восстановления разрешения в условиях, когда отражение происходит от единственной плоской поверхности, перпендикулярной оптической оси. С другой стороны, в более сложных сценариях (наклонные поверхности, движущиеся объекты, текстурированные мишени с варьируемыми спектральными свойствами) возникают физические ограничения, которые не могут быть преодолены только компенсацией дисперсии.

Вместе с тем экспериментальные данные демонстрируют, что рефлектограммы, полученные от различных типов отражателей (разные образцы наждачной бумаги, разные углы установки), обладают отчетливо различимыми интерференционными паттернами. Хотя эти паттерны не сводятся к простым параметрам (например, ширине пика) и не коррелируют напрямую с зернистостью, они являются уникальными для каждого образца и условий измерения. Это открывает перспективу применения методов машинного обучения, в частности глубоких нейронных сетей, для классификации типов отражателей и извлечения скрытых параметров. Довольно сложно аналитически связать форму рефлектограммы с физическими свойствами образца, поэтому мы полагаем, что можно накапливать статистику измерений для различных эталонных объектов и обучать модель распознаванию паттернов, соответствующих определенным классам поверхностей или угловых положений. Такой подход может оказаться

более устойчивым к перечисленным выше физическим искажениям и позволить использовать OFDR в задачах, где аналитические методы оказываются бессильны.

Перспективы дальнейших исследований включают несколько направлений. Первое — систематический сбор базы данных рефлектограмм для различных типов поверхностей (с контролируемыми параметрами шероховатости, цвета, угла наклона) и обучение нейросетевых классификаторов. Второе — адаптация метода компенсации дисперсии для работы с движущимися объектами, включая оптимизацию алгоритмов для работы в реальном времени. Третье направление — исследование возможности использования OFDR в сочетании с другими оптическими методами (например, поляризационной рефлектометрией) для повышения чувствительности к текстурным и спектральным характеристикам поверхности.

Устранение дисперсионного уширения открывает новые применения OFDR для измерений в свободном пространстве. Полученная высокая точность позволяет использовать OFDR в качестве эталонного дальномера для калибровки других сенсоров [23], а также в задачах, требующих высокой точности позиционирования, — например, при сборке прецизионного оборудования или в системах технического зрения мобильных роботов [4]. В задачах, где требуется получение эталонных траекторий движений (например, при разработке систем трекинга головы [18], конечностей или для оценки поструральной устойчивости [24]), OFDR может служить независимым высокоточным источником опорных данных. В отличие от инерциальных датчиков, он не подвержен дрейфу, а в отличие от оптических систем на основе маркеров — не требует сложной калибровки сцены [25]. Однако в этом случае стоит помнить, что хроматическая дисперсия является не единственным ограничивающим фактором для точности измерений, поэтому необходимо учитывать пока что неустраняемую погрешность, связанную с размытием пика отражений от поверхности под углом. То же касается анализа излучения, отраженного от поверхности с целью извлечения информации о ее свойствах. После устранения всего комплекса факторов система может стать чувствительной к текстурным особенностям мишени, что открывает возможность классификации материалов [19], оценки шероховатости [20] и выявления дефектов поверхности без контакта [7]. Подход может быть адаптирован для измерений через прозрачные среды (стекло, жидкость), где дисперсия вносит дополнительные искажения. Компенсация позволяет разделить вклады расстояния и показателя преломления, что важно для контроля качества жидкостей или оптических покрытий [26].

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрировано, что компенсация хроматической дисперсии является необходимым условием для использования OFDR в свободном пространстве в задачах, требующих субмиллиметрового разрешения и чувствительности к свойствам объекта.

Дальнейшие исследования будут направлены на набор данных для обучения глубоких нейронных сетей с целью автоматического распознавания параметров поверхности, включая присущие ей особенности и угол поворота относительно оптической оси коллиматора. Предполагается, что ощутимый прогресс в области развития программных и аппаратных комплексов для оптической рефлектометрии частотной области [27–30], в направлении поляризационной рефлектометрии разных видов [31–33], исследовании объектов и компонентов с высоким уровнем оптических потерь [34–36], а также в сфере искусственного интеллекта, применяемого для совершенствования распределенных сенсорных систем [37–40], позволят адаптировать многие волоконные методы исследования под открытые многокомпонентные среды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 124020600009-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Amann M.-C., Bosch T., Lescure M. et al.* Opt. Eng. 2001. V. 40. № 1. P. 10.
2. *Donges A., Noll R.* Laser Measurement Technology. Berlin: Springer, 2015.
3. *McManamon P.F.* Lidar Technologies and Systems. Bellingham: SPIE Press, 2019.
4. *Thrun S., Burgard W., Fox D.* Probabilistic Robotics. Cambridge, MA: MIT Press, 2005.
5. *Chen C., Seff A., Kornhauser A., Xiao J.* Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV). Santiago. 2015. P. 2722.
6. *Blais F. J.* Electron. Imaging. 2004. V. 13. № 1. P. 231.
7. *Zhang Z.* IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2000. V. 22. № 11. P. 1330.
8. *Tuchin V.V.* Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis. Bellingham: SPIE Press, 2015.
9. *Wang L.V., Wu H.-I.* Biomedical Optics: Principles and Imaging. Hoboken: Wiley, 2007.
10. *Кузнецова Л.В.* Поляризационная и когерентная рефлектометрия биотканей: физические основы, методы, приложения: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Саратов, 2006.
11. *Hsu T.-H., Liu C.-H., Sang T.-H. et al.* SSRN Preprint. 2023. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4608696>
12. *Ding Z., Wang C., Liu K. et al.* Sensors. 2018. V. 18. № 4. P. 1072. <https://doi.org/10.3390/s18041072>
13. *Kreger S.T., Rahim N.A.A., Garg N. et al.* Proc. SPIE. 2016. V. 9852. P. 98520T.
14. *Tkachenko A.Yu., Simonov V.A., Lobach I.A.* Proc. 2025 IEEE Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2025.
15. *Halmagyi G.M., Curthoys I.S.* Arch. Neurol. 1988. V. 45. № 7. P. 737.
16. *MacDougall H.G., Weber K.P., McGarvie L.A. et al.* Neurology. 2009. V. 73. № 14. P. 1134.

17. Shestakov A., Kambur D., Konstantinov Y. et al. Sensors. 2026. V. 26. № 2. P. 393. <https://doi.org/10.3390/s26020393>
18. Мамыкин Г.Д., Кулеш А.А., Барков Ф.Л. и др. Приборы и техника эксперимента. 2026. (в печати).
19. Hutiu Gh. Proc. Int. Conf. on Lasers in Medicine. 2018.
20. Shao M.Q., Xu D., Li S.Y. et al. J. Iron Steel Res. Int. 2023. V. 30. P. 1897. <https://doi.org/10.1007/s42243-023-00930-8>
21. Ciddor P.E. Appl. Opt. 1996. V. 35. № 9. P. 1566. <https://doi.org/10.1364/AO.35.001566>
22. Zou C. et al. J. Lightwave Technol. 2024. V. 42. № 15. P. 5407. <https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3391013>
23. Berkovic G., Shafir E. Adv. Opt. Photonics. 2012. V. 4. № 4. P. 441. <https://doi.org/10.1364/AOP.4.000441>
24. Mancini M., Horak F.B. Eur. J. Phys. Rehabil. Med. 2010. V. 46. № 2. P. 239.
25. Kothiya S., Mistree K. Proc. 2015 Int. Conf. on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO). Visakhapatnam, 2015. P. 1. <https://doi.org/10.1109/EESCO.2015.7253705>
26. Zhao Y., Zhao J., Zhao Q. Sens. Actuators A. 2020. V. 313. P. 112160. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112160>
27. Wosniok A., Königsbauer K., Nöther N. et al. e-J. Nondestruct. Test. 2024. V. 29. № 7. <https://doi.org/10.58286/29743>
28. Lobach I.A., Fotiadi A.A., Yatseev V.A. et al. Sensors. 2024. V. 24. № 16. P. 5432. <https://doi.org/10.3390/s24165432>
29. Zhang Zh., Peng W., Alsalman O. et al. Opt. Express. 2024. V. 32. № 14. P. 25074.
30. Turov A., Fotiadi A., Korobko D. et al. Sensors. 2025. V. 25. № 23. P. 7225. <https://doi.org/10.3390/s25237225>
31. Al-Shaikhli F., O'Sullivan M., Laperle C., Hui R. Proc. 2025 Optical Fiber Communications Conf. and Exhibition (OFC). San Francisco, 2025. P. 1.
32. Konstantinov Yu.A., Kryukov I.I., Pervadchuk V.P., Toroshin A.Yu. Quantum Electron. 2009. V. 39. № 11. P. 1068. <https://doi.org/10.1070/QE2009v039n11ABEH014171>
33. Smirnov A.S. et al. Quantum Electron. 2015. V. 45. № 1. P. 66. <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n01ABEH015634>
34. Belokrylov M.E. et al. Instrum. Exp. Tech. 2020. V. 63. № 4. P. 481. <https://doi.org/10.1134/S0020441220050012>
35. Von der Weid J.P., Passy R., Huttner B. et al. IEEE Photonics Technol. Lett. 1998. V. 10. № 7. P. 949.
36. Carvalho M.T., Gomes A.S.L., Sundheimer M.L. Optical Amplifiers and Their Applications. OSA Trends in Optics and Photonics Series. 2002. V. 77.
37. Wang H., Zhang Z., Wang Y. et al. IEEE Sens. J. 2026. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2026.3658647>

38. *Nordin N.D., Zan M.S.D., Abdullah F.* Photonics. 2020. V. 7. № 4. P. 79.
<https://doi.org/10.3390/photonics7040079>
39. *Karapanagiotis C., Krebber K.* Sensors. 2023. V. 23. № 13. P. 6187.
<https://doi.org/10.3390/s23136187>
40. *Nordin N.D., Abdullah F., Zan M.S.D. et al.* Sensors. 2022. V. 22. № 7. P. 2677.
<https://doi.org/10.3390/s22072677>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для оптической рефлектометрии частотной области в свободном пространстве
- Рис. 2.** Эксперимент с прецизионным рельсом: **а** – юстировка коллиматора; **б** – место крепления уголкового отражателя на каретке и прицеливание в видимом диапазоне; **в** – искажение пика отражения ($Ш_1$ – ширина нескомпенсированного пика)
- Рис. 3.** Интеграция волоконного коллиматора и пигтейла в область уха головы антропоморфного робота (3D-эскиз)
- Рис. 4.** Образцы наждачной бумаги с зернистостью от P80 до P5000, закрепленные на мишени
- Рис. 5.** Восстановление формы и позиции пика отражения после компенсации хроматической дисперсии ($Ш_2$ – ширина скомпенсированного пика)
- Рис. 6.** Паттерны отражений от образцов наждачной бумаги различной зернистости, полученные после компенсации хроматической дисперсии

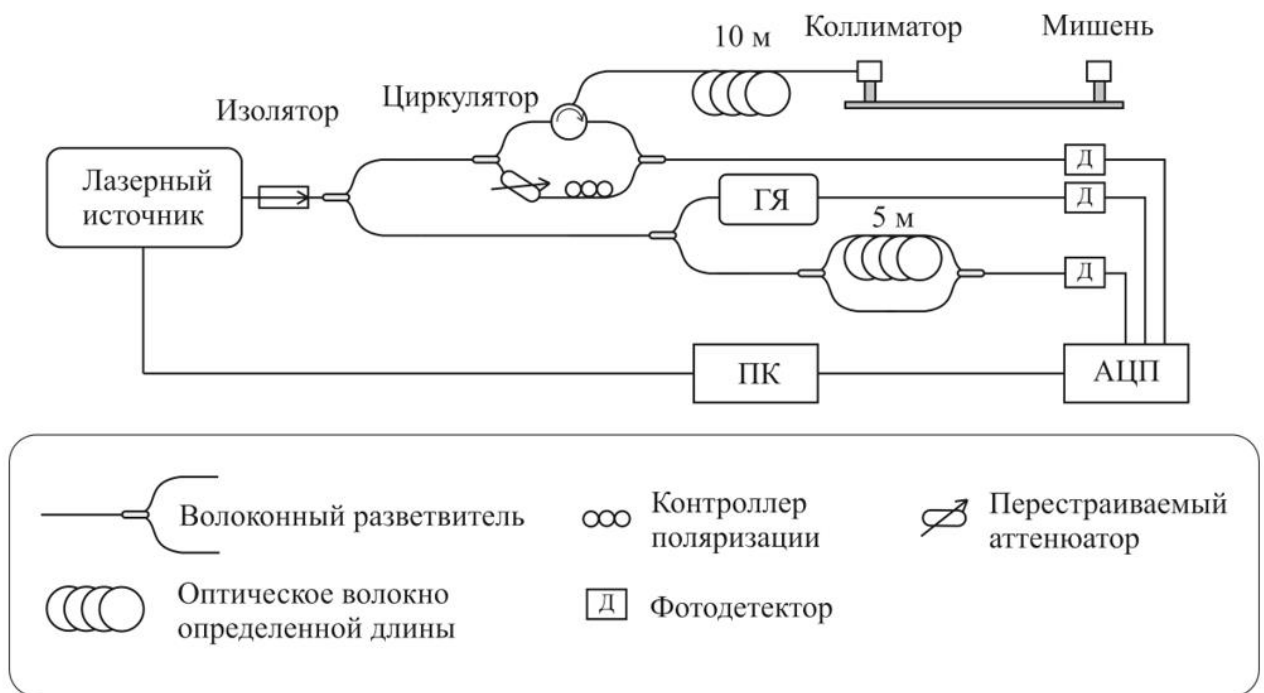


Рис. 1.



Рис. 2а

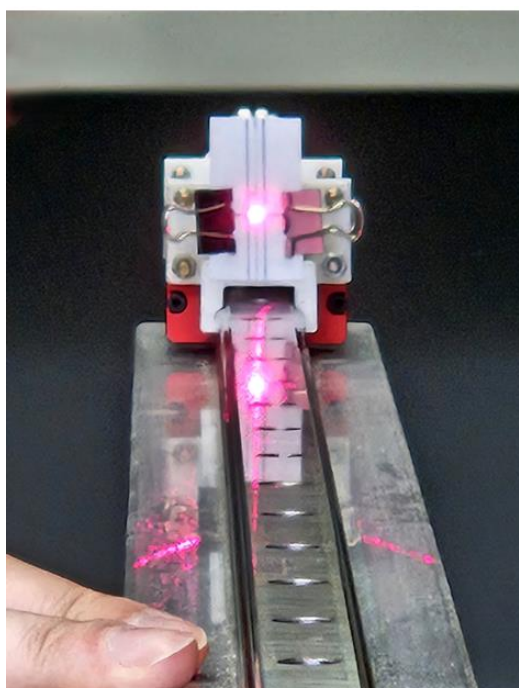


Рис. 2б

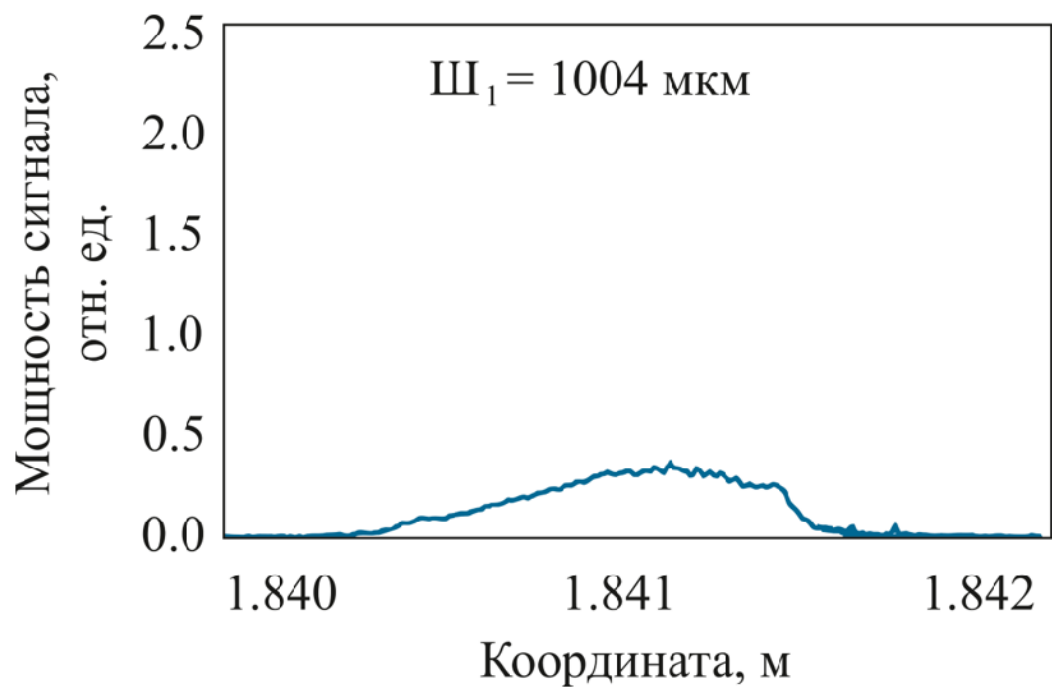


Рис. 2в

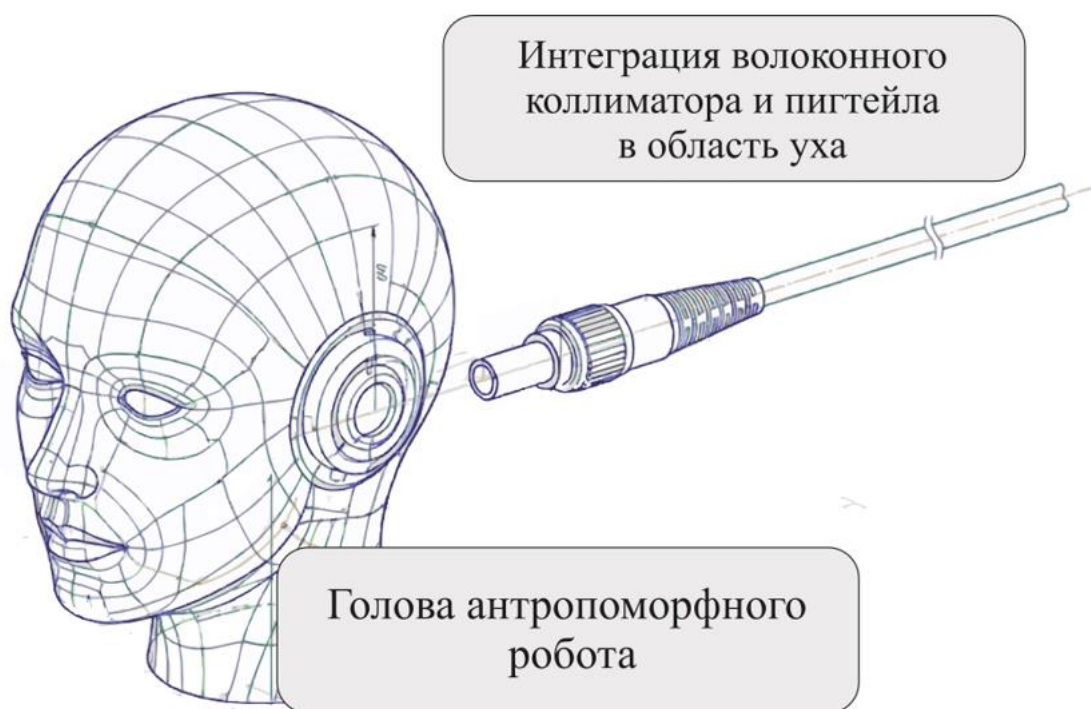


Рис. 3.

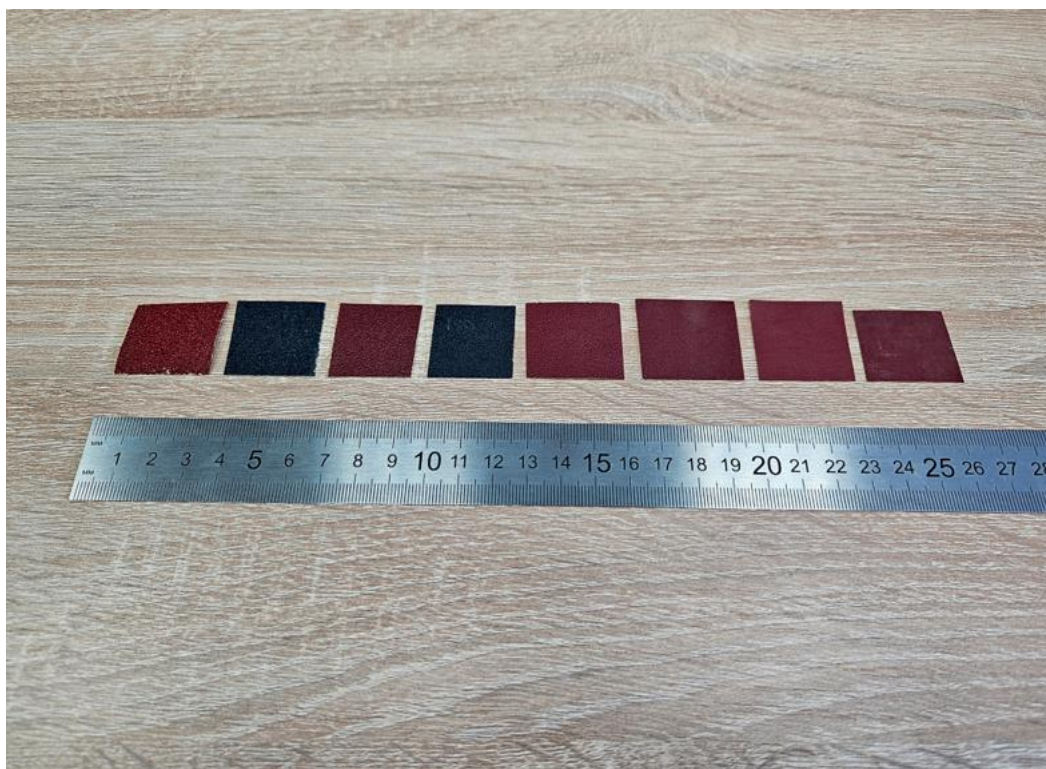


Рис. 4.

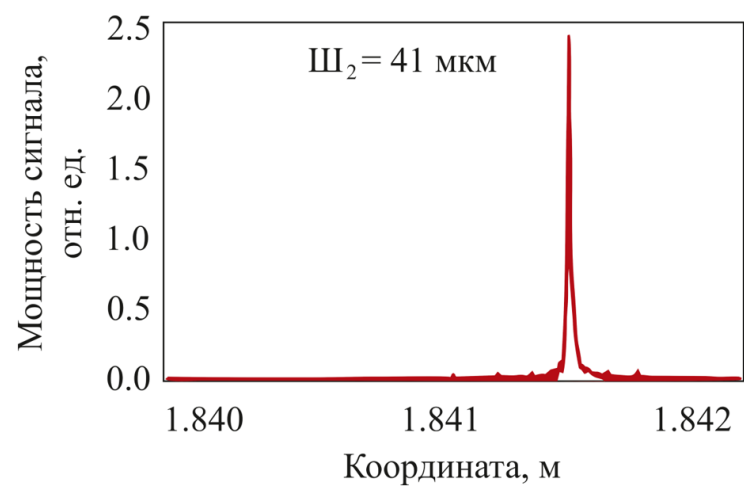


Рис. 5.

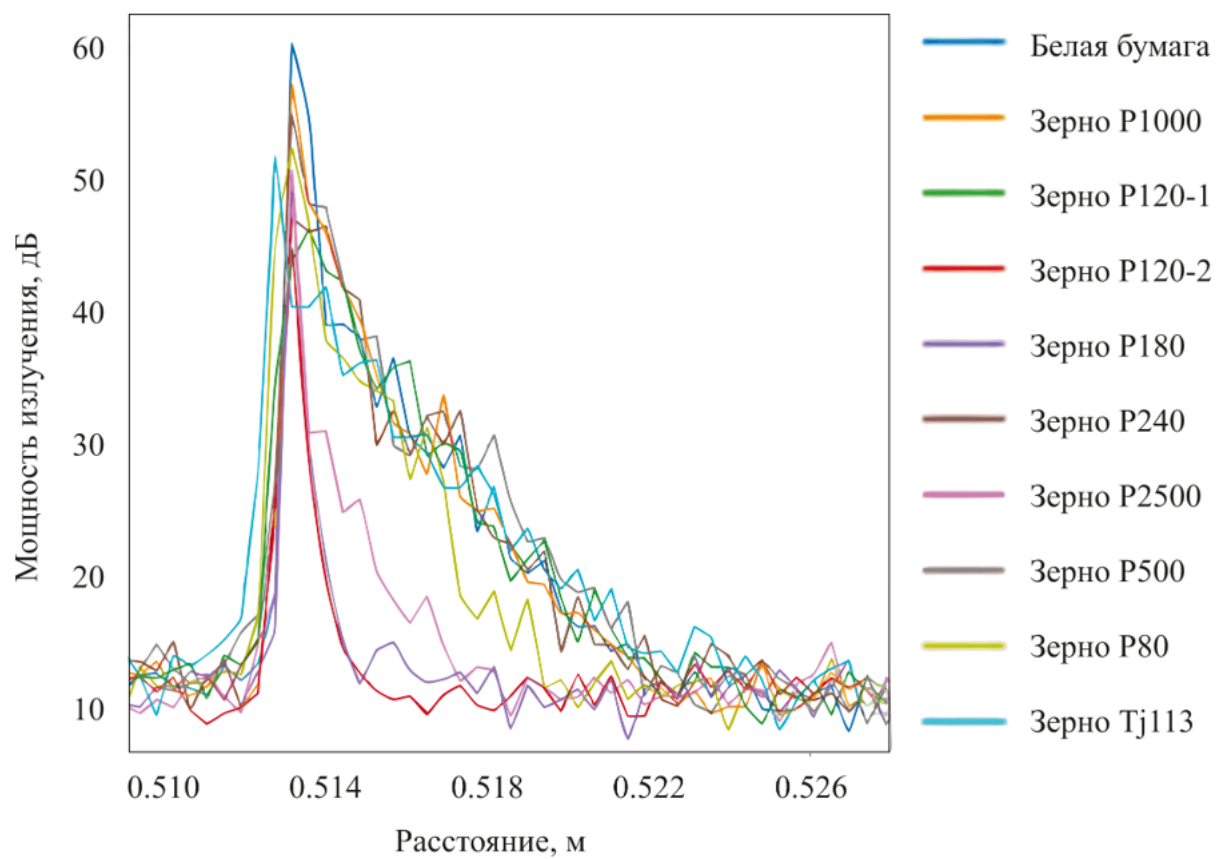


Рис. 6.