

УДК 681.7.068

СОВРЕМЕННАЯ ПРИБОРНАЯ БАЗА ОПТОВОЛОКОННЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ¹

(обзор)

©2026 г. Тотмина Е.Е.^{a, b, *}, Шестаков А.П.^a, Константинов Ю.А.^a,
Шардаков И.Н.^a

^aИнститут механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук
(ИМСС УрО РАН)

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

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

*E-mail: totmina_katya@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Представлен обзор современной приборной базы распределённых волоконно-оптических сенсорных систем для измерения полей деформации и температуры. Рассмотрены три класса технологий: Brillouin-эффектные рефлектометры временной области (BOTDR/BOTDA), обеспечивающие измерения на расстоянии до 200 км; рефлектометры частотной области (OFDR) с пространственным разрешением до единиц микрометров; фазочувствительные рефлектометры (φ-OTDR/DAS), предназначенные для регистрации динамических воздействий в реальном времени. Для каждого класса описаны физические принципы работы, ключевые метрологические характеристики и принципиальные аппаратные ограничения. Отдельно проанализированы методы обработки сигналов – от корреляционных алгоритмов извлечения Brillouin-эффектного частотного сдвига до нейросетевых подходов к классификации акустических событий, – также рассмотрены методы разделения вкладов температуры и деформации с использованием анизотропных волокон и гибридных схем рассеяния. Показано, что развитие приборной базы имеет две тенденции: углублённая специализация систем и их гибридизация на аппаратном и алгоритмическом уровнях. Также показано, что дальнейший прогресс в области распределённых измерений определяется совершенствованием компонентной базы, методов интеллектуальной обработки данных и стандартизации метрологических процедур.

Ключевые слова: распределённые волоконно-оптические датчики, Brillouin-рефлектометрия, оптическая рефлектометрия частотной области, фазочувствительная рефлектометрия, распределённые акустические сенсоры, измерение деформации, измерение температуры, обработка сигналов, машинное обучение, гибридные сенсорные системы.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития науки и техники характеризуется возрастающими требованиями к системам мониторинга и диагностики. В таких областях, как строительная механика, нефтегазовый инжиниринг, геофизика, энергетика и транспорт, критически важным становится получение достоверной информации о распределении температуры и механических деформаций вдоль протяжённых объектов [1, 2]. Традиционные точечные датчики – тензорезисторы и термопары – не способны обеспечить требуемую полноту картины, особенно на объектах километрового масштаба: трубопроводах, мостах, нефтяных скважинах и линиях электропередач. Альтернативным решением являются распределенные волоконно-оптические сенсорные системы, в которых стандартное оптическое волокно выступает одновременно каналом передачи данных и распределённым датчиком [3].

Данные системы обладают рядом преимуществ, определяющих их применимость в условиях, недоступных для электрических датчиков: полной электромагнитной невосприимчивостью, пассивностью (отсутствием электропитания в зоне измерений), малыми массой и габаритами, химической и термической стойкостью [4, 5]. Эти свойства делают волоконно-оптические сенсоры предпочтительными в условиях интенсивных электромагнитных полей: вблизи линий электропередач или в зонах с высокой грозовой активностью; при мониторинге объектов с важным требованием к искробезопасности, таких как нефте- и газохранилища [6, 7].

Технологической основой распределенных датчиков послужили методы оптической рефлектометрии, изначально разработанные для диагностики волоконно-оптических линий связи и параметризации оптоволокну [8, 9]. Первые коммерческие рефлектометры (OTDR), появившиеся в конце 1970-х годов, применялись исключительно для локализации повреждений, дефектов и измерения погонного затухания [10, 11]. Однако выявленная чувствительность параметров рассеянного излучения (рамановского, бриллюэновского, рэлеевского) к внешним воздействиям открыла принципиально новые возможности: пионерские работы 1980-х годов продемонстрировали пригодность рамановского рассеяния для распределённого измерения температуры [12, 13, 14], а впоследствии была установлена чувствительность бриллюэновского сдвига к механической деформации [15, 16, 17]. Данные открытия положили начало новому этапу развития оптических сенсоров, превратив волокно из пассивного канала передачи данных в мощный измерительный инструмент [18]. За последующие десятилетия сенсоры на оптическом волокне прошли путь от регистрации событий до высокоточного анализа полей температуры и деформации [19, 20].

Выбор технологии распределенных измерений определяется требованиями конкретной задачи, которые формируются вдоль трёх координат: метрологическая точность, пространственное разрешение и быстродействие [21, 22, 23]. Для задач мониторинга несущих конструкций, где процессы деформации имеют медленную динамику, необходима детальная регистрация абсолютных значений с высокой точностью. Применение прецизионных измерителей длины на основе рефлектометрии обеспечивает в этом случае достоверную оценку напряженно-деформированного состояния объекта [24, 25]. В геотермальных исследованиях и мониторинге протяженных подземных газохранилищ основной задачей является картирование стационарных или медленно меняющихся тепловых полей [26, 27], что требует стабильности измерений во времени и способности сенсора работать на предельных расстояниях [28]. Напротив, для задач сейсморазведки, охраны периметров и контроля динамических процессов в реальном времени (например, гидроударов в трубопроводах) на первое место выходят скорость регистрации и широкий частотный диапазон детектируемых акустических колебаний [29, 30, 31].

Рис. 1. Сравнительная диаграмма основных классов распределённых волоконно-оптических сенсорных систем по основным метрологическим параметрам. Положение системы внутри треугольника отражает баланс между параметрами

Таким образом, современный рынок и научные исследования предлагают широкий спектр решений, оптимизированных под различные сочетания этих параметров. Компромисс между ними иллюстрирует рис. 1: каждая из рассматриваемых технологий занимает отдельную нишу, а вектор развития приборной базы направлен либо на углублённую специализацию, либо на создание гибридных систем, объединяющих несколько физических принципов [32, 33].

2. ВЫСОКОТОЧНАЯ РАСПРЕДЕЛЁННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ МЕДЛЕННО МЕНЯЮЩИХСЯ ПРОЦЕССОВ

Наиболее зрелыми технологиями регистрации квазистатических полей являются системы на основе бриллюэновского рассеяния: рефлектометры BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) и анализаторы BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analyzer). В основе физического принципа лежит эффект неупругого рассеяния Мандельштама-Бриллюэна на акустических фонах – упругих волнах в кварцевом стекле, возбуждаемых тепловым движением [34, 35]: частотный сдвиг рассеянного излучения (Brillouin Frequency Shift, BFS) $\Delta\nu_s$ линейно зависит от температуры и продольной деформации сердцевины волокна [18, 36]:

$$\Delta\nu_s = C_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon + C_T \cdot \Delta T, \quad 1)$$

где $\Delta\varepsilon$ – изменение продольной деформации, ΔT – изменение температуры, C_ε и C_T – коэффициенты чувствительности к деформации и температуре соответственно.

Бриллюэновский частотный сдвиг при T_0 и ε_0 можно выразить в виде уравнения

$$\nu_s = 2 n \cdot V / \lambda, \quad (2)$$

где n – эффективный показатель преломления оптического волокна, V – скорость звука в материале, λ – длина волны зондирующего излучения.

Для одномодного кварцевого оптического волокна при комнатной температуре (20 °C) и длине волны зондирующего излучения 1550 нм ν_s составляет около 10.8–11.0 ГГц.

Локацию воздействия осуществляют по рефлектограмме – распределению амплитуды обратного рассеяния вдоль всей длины волокна. Это распределение в рефлектометрах временной области получают путем анализа временной задержки t между зондирующим импульсом и принятым сигналом рассеяния [37, 38] в соответствии с выражением

$$z = U_g \cdot t / 2, \quad (3)$$

где z – расстояние до точки рассеяния вдоль волокна, $U_g = c/n_g$ – групповая скорость света в волокне (c – скорость света, n_g – групповой показатель преломления).

В системах BOTDR (рис. 2) используется спонтанное бриллюэновское рассеяние (SpBS): лазерное излучение модулируется электрооптическим модулятором (ЭОМ) в короткие зондирующие импульсы, которые усиливаются волоконно-оптическим эрбиевым усилителем (EDFA), и направляется в чувствительное волокно (Fiber Under Test, FUT); сигнал спонтанного рассеяния проходит циркулятор, смешивается с непрерывным сигналом лазера (гетеродином), вследствие чего образуются оптические биения. Итоговый сигнал детектируется и поступает на блок спектрального анализа, где вычисляется BFS [39, 40]. Частота гетеродина сдвигается при помощи акустооптического модулятора (АОМ) на величину $\Delta\nu$, чтобы перенести сигнал оптических биений в радиочастотный диапазон.

Рис. 2. Конфигурация BOTDR: зондирующий импульс и детектирование спонтанного бриллюэновского рассеяния осуществляются с одного торца FUT через циркулятор

Схема с односторонним доступом упрощает монтаж и эксплуатацию, но имеет существенный недостаток – низкий уровень спонтанного рассеяния, из-за чего требуется применение сложных методов обработки сигнала [41, 42].

В системах BOTDA (рис. 3а) используется вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (Stimulated Brillouin Scattering, SBS): непрерывное излучение лазера с несущей частотой ν_0 разделяется на две части; первая часть (зондирующая волна), проходя однополосный модулятор с подавлением несущей SSBM, обретает частоту $\nu_0 - \nu_s$; непрерывный сигнал через изолятор ISO распространяется по FUT навстречу импульсу накачки, сформированному ЭОМ из второй части излучения и усиленному EDFA. При выполнении условия бриллюэновского резонанса – разность частот накачки и зондирующей волны равна бриллюэновскому сдвигу – происходит энергетический обмен между встречными волнами (рис. 3б). За счет увеличения мощности зондирующего излучения схема имеет существенно более высокое отношение сигнал/шум (ОСШ), тем самым, ограничение применения систем BOTDA связано с необходимостью двустороннего доступа к волокну [43, 44, 45].

Рис. 3. Конфигурация BOTDA с двусторонним доступом: а) оптическая схема с отдельными каналами накачки и зондирования; б) спектр бриллюэновского усиления при выполнении условия резонанса (разность частот накачки и зонда равна BFS)

Бриллюэновские рефлектометры являются лидерами по дальности: коммерческие и лабораторные образцы способны проводить измерения на расстояниях от 30 до 200 километров, однако препятствием к увеличению дальности обнаружения $z_{\text{макс}}$ является низкий уровень полезного сигнала, что требует усложнения системы [46, 47]. Также возникает компромисс, обусловленный физикой импульсного зондирования: повышение величины энергии зондирующего импульса и, как следствие, ОСШ, достигается за счет увеличения длительности импульса δt , что неизбежно снижает пространственное разрешение δz [48, 49]. Обнаруженное значение центральной частоты спектра отклоняется от реального, если изменение температуры или деформации происходит на длине волокна, меньшей, чем δz . При этом в условиях низкого ОСШ точность определения BFS существенно ухудшается, что приводит к увеличению погрешности измерения температуры и деформации [50].

Указанное ограничение стимулировало развитие аппаратной части [51, 52] и методов обработки бриллюэновских спектров. Классические подходы, такие как аппроксимация спектра кривой Лоренца или псевдо-Фойгта, оказались неэффективны для сигналов с низким ОСШ или шумом фотодетектора [4, 37, 53]. Им на смену пришли корреляционные методы, в том числе кросс-корреляция с эталонным спектром, извлекающие BFS из сильно зашумленных данных [38, 53, 54]. Следующим этапом развития направления стало применение техник обработки изображений: двумерный массив бриллюэновских спектров (координата-частота) рассматривается как изображение и обрабатывается

соответствующими методами двумерной фильтрации и корреляции [55–57]. Параллельно внедряются алгоритмы машинного обучения: нейронные сети и метод k-ближайших соседей (k-NN) демонстрируют высокую точность предсказания BFS при ограниченных вычислительных ресурсах [58–61]; ансамблевые методы и глубокое обучение дополнительно повышают помехоустойчивость [62, 63].

Самостоятельной проблемой является разделение вкладов температуры и деформации, проявляющихся в бриллюэновском спектре идентично – сдвигом частоты [64]. Одним из решений является анизотропное волокно с двойным лучепреломлением: в таких световодах бриллюэновский спектр расщепляется на два пика, соответствующих различным поляризационным модам с разными коэффициентами чувствительности к температуре и деформации [65–69]. Регистрация обоих пиков и решение системы уравнений (4) позволяют одновременно определять оба параметра [70–73]:

$$\begin{cases} \Delta\nu_{s_1} = C_{\varepsilon_1} \cdot \Delta\varepsilon + C_{T_1} \cdot \Delta T, \\ \Delta\nu_{s_2} = C_{\varepsilon_2} \cdot \Delta\varepsilon + C_{T_2} \cdot \Delta T, \end{cases} \quad (4)$$

где индексы «1» и «2» соответствуют двум поляризационным модам. Данный метод требует специального волокна и усложненной схемы обработки [69, 74], а дополнительным ограничением является низкая обусловленность системы (4): чем ближе коэффициенты чувствительности мод по значению, тем ближе определитель матрицы системы к нулю, что резко усиливает погрешность разделения параметров [70, 74].

Альтернативным решением является низкокогерентная рефлектометрия (или рефлектометрия белого света). Метод, основанный на интерферометрии с низкокогерентным источником, обладает способностью к высокоточному разделению температуры и деформации за счет анализа различных компонент рассеяния или использования волокон со специальной структурой [2, 18, 75] на относительно коротких базах [76, 77].

Наряду с перечисленными методами, широко применяется метод, основанный на мониторинге двух параллельных волокон: одно волокно изолировано от деформации и регистрирует только температурное изменение, второе подвержено полному воздействию; сравнение сдвигов BFS позволяет однозначно разделить оба параметра [18]. Также реализуется гибридная схема датчика, совмещающая BOTDA с рамановской рефлектометрией (ROTDR) в одном волокне: бриллюэновский сдвиг несёт информацию об изменении температуры и деформации, тогда как интенсивность рамановского сигнала – антистоксовой компоненты рассеянного света – восприимчива исключительно к температуре, благодаря чему возможно полное разделение параметров без дополнительного или специального волокна [2, 18].

Все рассмотренные методы временной области объединяет общее физическое ограничение: пространственное разрешение δz жёстко задаётся длительностью импульса и не может быть улучшено без потери ОСШ [78]. Применение кодированных последовательностей, таких как коды Голея или комплементарные последовательности, позволяет улучшить ОСШ, но не преодолевает данное ограничение [79, 80]. Стремление получить пространственное разрешение менее миллиметра при сохранении высокой чувствительности привело к развитию метода рефлектометрии в частотной области [81-83].

3. ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩАЯ РАСПРЕДЕЛЁННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ МЕДЛЕННО МЕНЯЮЩИХСЯ ПРОЦЕССОВ

Пространственное разрешение в оптической рефлектометрии частотной области (OFDR) на три-четыре порядка превосходит возможности временных методов, так как оно определяется диапазоном перестройки частоты (длины волны) лазера Δf [84, 85]. Частота лазера f перестраивается по известному закону

$$f = f_0 + \gamma t, \quad (5)$$

где f_0 – начальная частота, $\gamma = df/dt$ – скорость перестройки частоты, измеряемая в Гц/с.

Перестраиваемый лазер генерирует непрерывное излучение с линейно меняющейся во времени длиной волны [86–88] (рис. 4). Излучение разделяется делителем на два канала: зондирующий и вспомогательный, используемый для отслеживания нелинейности перестройки длины волны (AUX). Зондирующее излучение направляется в FUT и опорный канал, содержащий зеркало.

Рис. 4. Схема OFDR на основе интерферометра Маха–Цендера: вспомогательный канал компенсирует нелинейность перестройки лазера, основной канал регистрирует биения рэлеевского рассеяния FUT с опорным плечом

Рэлеевское рассеяние от каждой точки FUT на расстоянии z возвращается с временной задержкой $\tau = 2 \cdot z / U_g$ в соответствии с формулой (3) и попадает в делитель. Электрическое поле обратного рассеяния E_S можно выразить следующим образом:

$$E_S(t) = \sqrt{R(\tau)} E_0 \exp\{j[2\pi f_0(t - \tau) + \pi\gamma(t - \tau)^2 + e(t - \tau)]\}, \quad (6)$$

где $R(\tau)$ – коэффициент обратного рассеяния, t – время, $e(t)$ – нелинейные фазовые шумы, величина γ умножена на t дважды, поскольку она характеризует изменение во времени величины, уже во времени меняющейся.

В делителе сигнал обратного рассеяния смешивается с сигналом опорного плеча интерферометра, электрическое поле опорного плеча E_r описывается формулой (7). Электрическое поле складывается по принципу суперпозиции $E_\Sigma = E_r + E_S$:

$$E_r(t) = E_0 \exp\{j[2\pi f_0 t + \pi \gamma t^2 + e(t)]\}. \quad (7)$$

Поскольку оптическая частота опорного сигнала отличается от частоты сигнала рассеяния на величину, пропорциональную времени задержки, в делителе формируются оптические биения с частотой $f_b = \gamma \cdot \tau$. Полученный интерференционный сигнал, представляющий собой суперпозицию биений с различными частотами, детектируется фотоприёмником [89, 90]. Добавка к детектируемой интенсивности I_Σ , обусловленная интерференцией, имеет периодическую зависимость от времени:

$$I_\Sigma(t) = \sum_{\tau=0}^{\tau_{\max}} 2\sqrt{R(\tau)}E_0^2 \cos\{2\pi(\gamma\tau t)\}, \quad (8)$$

где суммирование ведется по всем центрам рассеяния, а время задержки $\tau_{\max}$ соответствует концу FUT.

Быстрое преобразование Фурье (FFT) данного сигнала позволяет восстановить частоту биения f_b от всех точек волокна и определить расстояние до них [91, 92]:

$$z = 1/2 \cdot U_g f_b / \gamma. \quad (9)$$

Тем самым, пространственное разрешение OFDR можно выразить через Δf :

$$\delta_z = 1/2 \cdot U_g / \Delta f. \quad (10)$$

При $\Delta f > 10$ ТГц теоретически разрешение δ_z достигает единицы микрометров. Столь высокое разрешение открывает возможности, недоступные для методов временной области: можно проводить детальный анализ коротких образцов специальных волокон для лазеров и усилителей, контроль качества сварных соединений, а также исследовать распределение двойного лучепреломления в анизотропных световодах [24, 93–95]. Метод также нашел применение в неразрушающем контроле заготовок активных оптических волокон, где он позволяет оценивать геометрические и люминесцентные параметры будущего световода [96–98].

Для измерения полей деформации и температуры в OFDR применяется метод корреляции рэлеевских рефлектограмм [99] — изменение температуры или деформации приводит к сдвигу спектра рэлеевского рассеяния $\Delta\nu_R$ [100, 101], пропорциональному величине воздействия:

$$\Delta\nu_R = K_\epsilon \cdot \Delta\epsilon + K_T \cdot \Delta T, \quad (11)$$

где K_ϵ , K_T — коэффициенты чувствительности к деформации и температуре, соответственно.

Математически данное соотношение аналогично бриллюэновскому (1), однако коэффициенты чувствительности существенно различаются: для волокна SMF-28 на длине волны 1550 нм $C_\varepsilon \approx 0.05\text{--}0.06$ МГц/мк ε , $C_T \approx 1.0\text{--}1.2$ МГц/°C [45]; $K_\varepsilon \approx 0.15$ ГГц/мк ε , $K_T \approx 1.0\text{--}1.3$ ГГц/°C [77, 100]. Столь высокая чувствительность обуславливает преимущество OFDR при измерениях малых деформаций и температурных градиентов. Сдвиг $\Delta\nu_R$ определяется кросс-корреляцией узких окон рефлектограмм исходного и нагруженного состояний волокна, что позволяет восстанавливать распределения воздействий с высоким пространственным разрешением вдоль всей длины волокна [32, 102]. Схематически процесс представлен на рис. 5, он состоит из следующих шагов:

- зарегистрированный сигнал в частотной области корректируется с учетом нелинейности перестройки лазера;
- к обоим спектрам применяется FFT, в результате получаются рефлектограммы;
- по рефлектограмме «скользит» окно заданной длины, соответствующей базе измерения (gauge length), для каждой позиции окна применяется обратное FFT;
- спектр каждого локального участка волокна с воздействием сравнивается методом кросс-корреляции с соответствующим участком волокна в ненагруженном состоянии; если в данном участке есть воздействие, то происходит сдвиг спектров друг относительно друга (смещение пика кросс-корреляции относительно 0);
- величина сдвига пересчитывается в температуру или деформацию по выражению (11).

Рис. 5. Последовательность обработки рэлеевских рефлектограмм методом скользящего окна и кросс-корреляции: сдвиг пика корреляции относительно нулевой позиции пересчитывается в величину деформации и/или изменения температуры через коэффициенты K_ε и K_T

Достижение предельных характеристик OFDR требует решения ряда технических проблем, главная из которых – нелинейность перестройки частоты лазера, приводящая к ухудшению разрешения и появлению ложных пиков на рефлектограмме [103, 104]. Для ее компенсации применяются как аппаратные способы (вспомогательный интерферометр для отслеживания длины волны, рис. 4, и оптоэлектронная петля для фазовой автоподстройки [105–107]), так и алгоритмические методы (эмпирическая модовая декомпозиция для адаптивной фильтрации [108], оптимизация демодуляции на основе аналитического сигнала [109], сверточные нейронные сети [110] и вейвлет-денойзинг двумерных спектрограмм [111]).

Существенным недостатком OFDR остается низкое быстродействие: необходимость частотного сканирования в широком диапазоне с последующей обработкой многомерных массивов данных делает время однократного измерения несовместимым с регистрацией

быстропротекающих процессов [112–114]. Отдельные работы демонстрируют возможность динамических измерений средствами OFDR [105, 115, 116], однако подобные решения требуют даже еще более сложной аппаратной реализации и остаются исключением. Характерная для OFDR зависимость времени измерения от требуемого разрешения ограничивает применимость метода и обуславливает востребованность альтернативных методов рефлектометрии, в которых приоритет смещен с предельного разрешения на максимальное быстродействие.

4. ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ РАСПРЕДЕЛЁННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОЦЕССОВ

Для регистрации динамических воздействий – акустических волн, вибраций и сейсмических сигналов – наиболее эффективными являются системы на базе фазочувствительной рефлектометрии во временной области (φ-OTDR) [117–119], получившие в англоязычной литературе устойчивое обозначение «распределенный акустический сенсор» (DAS) [21, 120]. В базовой конфигурации DAS (рис. 6) лазерное излучение модулируется ЭОМ (или АОМ) в короткие зондирующие импульсы, усиливается EDFA и направляется в чувствительное волокно FUT. В отличие от классического OTDR, используется высококогерентный источник, что обеспечивает интерференцию сигналов рэлеевского рассеяния от различных участков волокна в пределах длительности импульса [121, 122]. Результирующая амплитуда суммарного обратнорассеянного сигнала, регистрируемая фотоприемником, чрезвычайно чувствительна к изменениям оптической длины пути [123, 124].

Рис. 6. Регистрация акустического воздействия DAS: высококогерентный зондирующий импульс создает интерференционный рэлеевский сигнал, чувствительный к микроскопическим изменениям оптической длины пути волокна; фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ в точке воздействия детектируется по изменению амплитуды рефлектограммы и идентифицируется по частотному спектру

Физическое воздействие от внешнего источника модулирует фазу рэлеевского рассеяния в точке воздействия:

$$\Delta\varphi = 4\pi n/\lambda \cdot \Delta z, \quad (12)$$

где $\Delta\varphi$ – фазовый сдвиг, λ – длина волны излучения, Δz – изменение оптической длины пути под воздействием.

Рефлектограмма отображает мгновенное состояние волокна; по набору рефлектограмм можно локализовать источник воздействия, а спектральный анализ зарегистрированного сигнала в точке воздействия позволяет идентифицировать источник

акустического воздействия по характерному частотному спектру. Пространственное разрешение DAS пропорционально длительности зондирующего импульса:

$$\delta z = U_g \cdot \tau / 2. \quad (13)$$

Любое акустическое воздействие, вызывающее микроскопические деформации волокна, модулирует фазу рассеянных волн и изменяет картину интерференции [31, 125]. Методы гетеродинного детектирования и восстановления фазы позволяют количественно реконструировать форму акустической волны вдоль всего сенсорного волокна [126, 127].

За последнее десятилетие сильно вырос спрос на системы DAS ввиду их широкого внедрения в самые разные научные и прикладные области [128, 129]. Способность DAS превращать километры стандартного телекоммуникационного волокна в распределенную антенну из тысячи – десятков тысяч «виртуальных микрофонов» открыла новые возможности для мониторинга протяженных объектов. Сегодня DAS применяют в сейсмологии для проведения вертикального сейсмического профилирования в скважинах, охране периметров и мониторинге протяженных объектов, таких как трубопроводы и железнодорожные пути [130, 131]. За счет высокой чувствительности и большой ширины диапазона регистрируемых частот диапазон применений постоянно расширяется, теперь он включает такие нетривиальные задачи, как регистрация биоакустических сигналов [30, 132]. Восприимчивость системы к акустическому полю существенно зависит от типа волокна: конструкция световода, материал оболочки и профиль показателя преломления сердцевины определяют частотный отклик сенсора [133], и для конкретной задачи требуется тщательный подбор волокна [3, 134].

Качество данных DAS в значительной мере определяется методами цифровой обработки сигналов. Исходный сигнал содержит когерентный шум, шум источника и иные паразитные компоненты, подавление которых является необходимым условием выделения полезного сигнала [30, 135]. Простые методы, такие как скользящее усреднение по соседним пространственным каналам или временным отсчетам, дают ограниченный эффект и сопровождаются сглаживанием полезного сигнала [136–138]. Последовательное применение набора алгоритмов позволяет достичь синергетического эффекта и значительно повысить SNR [139, 140]. Перспективными являются методы нелинейной обработки двумерных массивов данных, в частности, динамическое усреднение с функциями активации, адаптивно подавляющие шум при сохранении резких фронтов сигнала [31, 141, 142]. Для узконаправленных приложений, таких как распознавание голосовых команд или мониторинг промышленных объектов, требуется комплексная настройка параметров оптического тракта – длительности импульса, частоты дискретизации и алгоритмов классификации сигналов [126, 143, 144].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что создание универсального сенсора, одновременно обеспечивающего высокую точность, сверхвысокое разрешение и быстрое действие на километровых дистанциях, остается задачей, сопряженной с физическими и техническими компромиссами [145, 146]. Каждая из рассмотренных технологий занимает определенную нишу в пространстве параметров «дальность – пространственное разрешение – точность – скорость измерений» [21]. Бриллюэновские рефлектометры доминируют на сверхбольших дистанциях при измерении деформации или одновременном детектировании температуры и деформации, OFDR является лидером по пространственному разрешению, DAS не имеет конкурентов по скорости регистрации динамических процессов [127, 147]. Этот технологический компромисс, наглядно представленный на рис. 1, определяет вектор дальнейших исследований [148].

Анализ современного состояния приборной базы выявляет разнонаправленное движение исследовательских усилий [148]. С одной стороны, происходит углубленная специализация систем под конкретные прикладные задачи (достижение высоких показателей в узком диапазоне условий [150, 151]), с другой – объединение в одной системе различных физических принципов с целью расширения информативности измерений [152, 153]. Гибридизация происходит на аппаратном уровне (усложнение оптической схемы) и/или на уровне алгоритмов, объединяющих данные разных физических механизмов [154–156], например, совместное использование бриллюэновского и рэлеевского рассеяния для разделения температуры и деформации [18] и адаптация OFDR к динамичному режиму [105].

Существенными остаются аппаратные ограничения для всех рассмотренных систем. Предельная дальность BOTDR/BOTDA ограничена нарастающим затуханием зондирующего импульса и шумом детекторов и усилителей. В OFDR основным аппаратным ограничением являются фазовые шумы и нелинейность перестройки частоты лазера: незначительные отклонения от линейного закона (5) приводят к размытию пиков на рефлектограмме и возникновению артефактов [103, 104]. В системах DAS проблему представляет когерентный замирающий шум (fading noise), являющийся сложноустраняемым, несмотря на методы компенсации и передискретизации [136, 137, 139]. Для преодоления этих и других аппаратных ограничений происходят совершенствование методов обработки сигналов и внедрение нейронных сетей [157, 158]. Алгоритмы машинного и глубокого обучения применяются на всех этапах измерительного процесса: от первичной фильтрации зашумленных данных [59, 159] до высокоуровневой классификации событий и распознавания образов [160]. Развитие

области обработки данных будет существенно влиять на облик систем следующего поколения [158, 161].

Современный этап развития распределённых волоконно-оптических сенсорных систем можно описать как сформировавшуюся технологию мониторинга, объединяющую разнообразие реализаций и широкий прикладной охват. Дальнейший прогресс в этой области будет определяться совершенствованием компонентной базы, развитием методов интеллектуальной обработки сигналов и стандартизацией метрологического обеспечения. Такое всестороннее развитие обеспечит переход технологии к массовому внедрению во все сферы деятельности человека [161].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование было проведено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00108-П.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы утверждают отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A. // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>
2. Taranov M.A., Gorshkov B.G., Alekseev A.E. et al. // *Instrum. Exp. Tech.* 2023. V. 66. P. 713–729. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050238>
3. Turov A.T., Konstantinov Y.A., Claude D., Maximenko V.A., Krishtop V.V., Korobko D.A., Fotiadi A.A. // *Appl. Sci.* 2024. V. 14. P. 10147. <https://doi.org/10.3390/app142210147>
4. Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Y.A. et al. // *Instrum. Exp. Tech.* 2022. V. 65. P. 687–710. <https://doi.org/10.1134/S0020441222050268>
5. Alhussein A.N.D., Qaid M.R.T.M., Agliullin T., Valeev B., Morozov O., Sakhabutdinov A., Konstantinov Y.A. // *Sensors*. 2025. V. 25. P. 4275. <https://doi.org/10.3390/s25144275>
6. Zhang X., Qi J., Liang X., Guan Z., Liu Z., Zhang C. et al. // *Photonics*. 2025. V. 12. P. 7. <https://doi.org/10.3390/photonics12010007>
7. Wang R., Li H., Liu C., Dai J., Cheng C., Hu W., Yang M. // *IEEE Sens. Rev.* 2026. V. 3. P. 219–242. <https://doi.org/10.1109/SR.2026.3652038>
8. Healey P. // *J. Lightwave Technol.* 1985. V. 3. P. 876–886. <https://doi.org/10.1109/jlt.1985.1074281>
9. Burdin V.V., Konstantinov Y.A., Pervadchuk V.P., Smirnov A.S. // *Quantum Electron.* 2013. V. 43. P. 531–534. <https://doi.org/10.1070/qe2013v043n06abeh014995>

10. Vlasov V.A., Gulyaev Yu.V., Potapov V.T., Sosnin V.P., Tregub D.P., Shpilevskii R.V., Elenkrig B.B. // Sov. J. Quantum Electron. 1981. V. 11. P. 1100–1101. <https://doi.org/10.1070/qe1981v011n08abeh008062>
11. Barnoski M.K., Rourke M.D., Jensen S.M., Melville R.T. // Appl. Opt. 1977. V. 16. P. 2375–2379. <https://doi.org/10.1364/AO.16.002375>
12. Dakin J.P., Pratt D.J., Bibby G.W., Ross J.N. // Electron. Lett. 1985. V. 21. P. 569–570. <https://doi.org/10.1049/el:19850402>
13. Hartog A.H., Leach A.P., Gold M.P. // Electron. Lett. 1985. V. 21. P. 1061–1062. <https://doi.org/10.1049/el:19850752>
14. Farahani M.A., Gogolla T. // J. Lightwave Technol. 1999. V. 17. P. 1379–1391. <https://doi.org/10.1109/50.779159>
15. Horiguchi T., Kurashima T., Tateda M. // IEEE Photonics Technol. Lett. 1989. V. 1. P. 107–108. <https://doi.org/10.1109/68.34756>
16. Bao X., Webb D.J., Jackson D.A. // Opt. Lett. 1994. V. 19. P. 141. <https://doi.org/10.1364/OL.19.000141>
17. Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M. // Opt. Lett. 1990. V. 15. P. 1038–1040. <https://doi.org/10.1364/OL.15.001038>
18. Turov A., Fotiadi A., Korobko D., Panyayev I., Belokrylov M., Barkov F., Konstantinov Y., Kambur D., Sakhabutdinov A., Qaid M. // Sensors. 2025. V. 25. P. 7225. <https://doi.org/10.3390/s25237225>
19. Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Y.A. et al. // Optoelectron. Instrument. Proc. 2025. V. 61. P. 631–639. <https://doi.org/10.3103/S8756699025700712>
20. Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Burdin V.V., Krivosheev A.I. // Instrum. Exp. Tech. 2020. V. 63. P. 487–493. <https://doi.org/10.1134/S0020441220040223>
21. Bao X., Chen L. // Sensors. 2012. V. 12. P. 8601–8639. <https://doi.org/10.3390/s120708601>
22. Lu P., Lalam N., Badar M., Liu B., Chorpening B.T., Buric M.P., Ohodnicki P.R. // Appl. Phys. Rev. 2019. V. 6. P. 041302. <https://doi.org/10.1063/1.5113955>
23. Bado M.F., Casas J.R., Dey A., Gil Berrocal C. // Sensors. 2020. V. 20. P. 5788. <https://doi.org/10.3390/s20205788>
24. Shestakov A., Kambur D., Konstantinov Y., Belokrylov M., Claude D., Shardakov I., Turov A. // Sensors. 2026. V. 26. P. 393. <https://doi.org/10.3390/s26020393>
25. Belokrylov M.E., Claude D., Konstantinov Y.A. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2023. V. 66. P. 761–768. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050172>
26. Chalari A. et al. // Conference Proceedings. 2024. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202430034>
27. Zou X., Wang T., Hu X., Han W., Hu H., Yang C. // Geoenergy Sci. Eng. 2024. V. 242. P. 213252. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213252>
28. Krivosheev A.I., Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Pervadchuk V.P. // Instrum. Exp. Tech. 2021. V. 64. P. 715–719. <https://doi.org/10.1134/S0020441221050067>

29. Gritsenko T.V., Orlova M.V., Zhirnov A.A., Konstantinov Y.A., Turov A.T., Barkov F.L., Khan R.I., Koshelev K.I., Svelto C., Pnev A.B. // *Sensors*. 2024. V. 24. P. 2281. <https://doi.org/10.3390/s24072281>
30. Turov A.T., Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Lopez-Mercado C.A., Fotiadi A.A. // *Algorithms*. 2023. V. 16. P. 217. <https://doi.org/10.3390/a16050217>
31. Turov A.T., Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Korobko D.A., Lopez-Mercado C.A., Fotiadi A.A. // *Algorithms*. 2023. V. 16. P. 440. <https://doi.org/10.3390/a16090440>
32. Turov A.T., Barkov F.L., Belokrylov M.E. et al. // *Instrum. Exp. Tech.* 2023. V. 66. P. 802–808. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050263>
33. Zou W., Long X., Chen J. *Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications*, InTech, 2015. <https://doi.org/10.5772/59145>
34. Nikles M., Thevenaz L., Robert P.A. // *J. Lightwave Technol.* 1997. V. 15. P. 1842–1851. <https://doi.org/10.1109/50.633570>
35. Thévenaz L. // *Front. Optoelectron. China*. 2010. V. 3. P. 13–21. <https://doi.org/10.1007/s12200-009-0086-9>
36. Barkov F.L., Konstantinov Y.A. // *Instrum. Exp. Tech.* 2023. V. 66. P. 753–760. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050044>
37. Galindez-Jamioy C.A., Lopez-Higuera J.M. // *J. Sens.* 2012. V. 2012. P. 204121. <https://doi.org/10.1155/2012/204121>
38. Zornoza A., Olier D., Sagues M., Loayssa A. // *Meas. Sci. Technol.* 2010. V. 21. P. 094021. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/9/094021>
39. Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Krivosheev A.I. // *Fibers*. 2020. V. 8. P. 60. <https://doi.org/10.3390/fib8090060>
40. Barkov F.L., Krivosheev A.I., Konstantinov Y.A., Davydov A.R. // *Fibers*. 2023. V. 11. P. 51. <https://doi.org/10.3390/fib11060051>
41. Shimizu K., Horiguchi T., Koyamada Y., Kurashima T. // *Opt. Lett.* 1993. V. 18. P. 185–187. <https://doi.org/10.1364/OL.18.000185>
42. Koyamada Y., Sakairi Y., Takeuchi N., Adachi S. // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2007. V. 19. P. 1910–1912. <https://doi.org/10.1109/LPT.2007.908651>
43. Horiguchi T., Tateda M. // *J. Lightwave Technol.* 1989. V. 7. P. 1170–1176. <https://doi.org/10.1109/50.32378>
44. Hotate K., Ong S.S.L. // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2003. V. 15. P. 272–274. <https://doi.org/10.1109/LPT.2002.806107>
45. Lalam N., Ng W.P., Dai X., Wu Q., Fu Y.Q. // *Proc. Special Session on Optical Sensors, 4th Int. Conf. Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS), Rome, Italy. 2016. P. 333–340.* <https://doi.org/10.5220/0005842803330340>
46. Song M., Xia Q., Feng K. et al. // *Opt. Quantum Electron.* 2016. V. 48. P. 30. <https://doi.org/10.1007/s11082-015-0314-z>
47. Zhang L., Wang Z., Li J., Zeng J., Li Y., Jia X., Rao Y. // *Opt. Laser Technol.* 2015. V. 68. P. 206–210. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.12.001>

48. Song K.Y., Chin S., Primerov N., Thevenaz L. // J. Lightwave Technol. 2010. V. 28. P. 2062–2067. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2050763>
49. Foaleng S.M., Tur M., Beugnot J.C., Thevenaz L. // J. Lightwave Technol. 2010. V. 28. P. 2993–3003. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2073443>
50. Zhou D.P., Dong Y., Wang B., Chen L. // Light Sci. Appl. 2018. V. 7. P. 32. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0030-0>
51. Coscetta A., Minardo A., Zeni L. // Sensors. 2020. V. 20. P. 5629. <https://doi.org/10.3390/s20195629>
52. Peled Y., Motil A., Tur M. // Opt. Express. 2012. V. 20. P. 8584–8591. <https://doi.org/10.1364/OE.20.008584>
53. Nordin N.D., Abdullah F., Zan M.S.D., A Bakar A.A., Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Y.A. // Sensors. 2022. V. 22. P. 2677. <https://doi.org/10.3390/s22072677>
54. Konstantinov Y., Krivosheev A., Barkov F. // Algorithms. 2024. V. 17. P. 365. <https://doi.org/10.3390/a17080365>
55. Krivosheev A., Kambur D., Turov A., Belokrylov M., Konstantinov Y., Agliullin T., Lipatnikov K., Barkov F. // Optics. 2025. V. 6. P. 40. <https://doi.org/10.3390/opt6030040>
56. Soto M.A., Ramirez J.A., Thevenaz L. // Nat. Commun. 2016. V. 7. P. 10870. <https://doi.org/10.1038/ncomms10870>
57. Soto M.A., Ramírez J.A., Thévenaz L. // J. Lightwave Technol. 2018. V. 36. P. 1168–1177. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2750398>
58. Almoosa A.S., Zan M.S., Ibrahim M.F. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2023. V. 66. P. 745–752. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050275>
59. Al-Ashwal N.H., Al Soufy K.A.M., Hamza M.E., Swillam M.A. // Sensors. 2023. V. 23. P. 6486. <https://doi.org/10.3390/s23146486>
60. Wang B., Wang L., Yu H., Lu Y. // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 25430–25441. <https://doi.org/10.1364/OE.27.025430>
61. Azendorf F., Krebber K. // Sensors. 2022. V. 22. P. 8255. <https://doi.org/10.3390/s22218255>
62. Karapanagiotis C., Krebber K. // Sensors. 2023. V. 23. P. 6187. <https://doi.org/10.3390/s23136187>
63. Zhang Z., Vallifuoco R., Coscetta A., Zeni L., Ma X., Minardo A. // Opt. Laser Technol. 2026. V. 203, Part C. Art. 115841. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2026.115841>
64. Parker T.R., Farhadiroushan M., Handerek V.A., Rogers A.J. // IEEE Photonics Technol. Lett. 1997. V. 9. P. 979–981. <https://doi.org/10.1109/68.593372>
65. Smirnov A.S., Burdin V.V., Konstantinov Y.A., Petukhov A.S., Drozdov I.R., Kuz'minykh Ya.S., Besprozvannykh V.G. // Quantum Electron. 2015. V. 45. P. 66–68. <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n01ABEH015634>
66. Parker T.R., Farhadiroushan M., Handerek V.A., Rogers A.J. // Opt. Lett. 1997. V. 22. P. 787–789. <https://doi.org/10.1364/OL.22.000787>
67. Smith J., Brown A., DeMerchant M., Bao X. // Appl. Opt. 1999. V. 38. P. 5372–5377. <https://doi.org/10.1364/AO.38.005372>

68. Dong Y., Chen L., Bao X. // IEEE Photonics Technol. Lett. 2010. V. 22. P. 1364–1366. <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2056678>
69. Coscetta A., Catalano E., Vallifuoco R., Zeni L., Minardo A. // IEEE Sensors J. 2025. V. 25. P. 32691–32697. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2025.3591026>
70. Motil A., Bergman A., Tur M. // Opt. Laser Technol. 2016. V. 78. P. 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.013>
71. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86 (Suppl. 1). P. S156–S162. <https://doi.org/10.3103/S1062873822700599>
72. Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Bochkova S.D., Smirnov A.S., Burdin V., Krivosheev A., Nosova E.A., Smetannikov O.Y. // Quantum Electron. 2019. V. 49. P. 514–517. <https://doi.org/10.1070/QEL16832>
73. Konstantinov Y.A., Kryukov I.I., Pervadchuk V.P., Toroshin A.Y. // Quantum Electron. 2009. V. 39. P. 1068–1070. <https://doi.org/10.1070/QE2009v039n11ABEH014171>
74. Zou W., He Z., Hotate K. // Opt. Express. 2009. V. 17. P. 1248–1255. <https://doi.org/10.1364/OE.17.001248>
75. Murray M.J., Murray J.B., Ogden H.M., Redding B. // Opt. Express. 2023. V. 31. P. 287–300. <https://doi.org/10.1364/OE.477481>
76. Otsubo K. et al. // J. Lightwave Technol. 2024. V. 42. P. 6233–6239. <https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3436928>
77. Froggatt M., Moore J. // Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 1735–1740. <https://doi.org/10.1364/AO.37.001735>
78. Bao X., Zhou Z., Wang Y. // PhotoniX. 2021. V. 2. P. 14. <https://doi.org/10.1186/s43074-021-00038-w>
79. Muanenda Y., Oton C.J., Di Pasquale F. // Front. Phys. 2019. V. 7. P. 155. <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00155>
80. Goldman R., Agmon A., Nazarathy M. // J. Lightwave Technol. 2013. V. 31. P. 2207–2222. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2264273>
81. Bernini R., Minardo A., Zeni L. // IEEE Photonics J. 2012. V. 4. P. 48–56. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2011.2179024>
82. Ding Z., Wang C., Liu K., Jiang J., Yang D., Pan G., Pu Z., Liu T. // Sensors. 2018. V. 18. P. 1072. <https://doi.org/10.3390/s18041072>
83. Soller B., Gifford D., Wolfe M., Frolich M. // Opt. Express. 2005. V. 13. P. 666–674. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000666>
84. Barrias A., Casas J.R., Villalba S. // Sensors. 2016. V. 16. P. 748. <https://doi.org/10.3390/s16050748>
85. Schenato L. // Appl. Sci. 2017. V. 7. P. 896. <https://doi.org/10.3390/app7090896>
86. Ding Z., Yao X.S., Liu T., Du Y. // Opt. Express. 2012. V. 20. P. 28319–28329. <https://doi.org/10.1364/OE.20.028319>
87. Kreger S.T., Gifford D.K., Froggatt M.E., Soller B.J. Proc. Optical Fiber Sensors (OFS), 2006, paper ThE42. <https://doi.org/10.1364/OFS.2006.ThE42>

88. Palmieri L., Schenato L. // *Open Opt. J.* 2013. V. 7. P. 104–127. <https://doi.org/10.2174/1874328501307010104>
89. Li T., Liu Q., Chen D., Fan X., He Z. *Proc. Asia Pacific Optical Sensors Conference*, Optica Publishing Group, 2016, paper W4A.50. <https://doi.org/10.1364/APOS.2016.W4A.50>
90. Hartog A.H. // *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. CRC Press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315119014>
91. He Z., Liu Q. // *J. Lightwave Technol.* 2021. V. 39. P. 3671–3686. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3059771>
92. Park Y., Ahn T.-J., Kieffer J.-C., Azana J. // *Proc. Conf. Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. 2007. <https://doi.org/10.1109/CLEO.2007.4453081>
93. Karnaushkin P.V., Konstantinov Y.A. // *Instrum. Exp. Tech.* 2021. V. 64. P. 709–714. <https://doi.org/10.1134/S0020441221040187>
94. Belokrylov M.E., Konstantinov Y.A., Latkin K.P., Claude D., Seleznev D.A., Stepin A.A., Konin Y.A., Shcherbakova V.A., Kashina R.R. // *Instrum. Exp. Tech.* 2020. V. 63. P. 481–486. <https://doi.org/10.1134/S0020441220050012>
95. Ponomarev R.S., Konstantinov Y.A., Belokrylov M.E. *et al.* // *Instrum. Exp. Tech.* 2022. V. 65. P. 787–796. <https://doi.org/10.1134/S0020441222050190>
96. Konstantinov Y.A. *et al.* // *Sci. Vis.* 2017. V. 9. P. 47–58. <https://doi.org/10.26583/sv.9.4.05>
97. Burdin V.V., Konstantinov Y.A., Claude D. *et al.* // *Instrum. Exp. Tech.* 2021. V. 64. P. 768–775. <https://doi.org/10.1134/S0020441221050031>
98. Konstantinov Y.A., Turov A.T., Latkin K.P., Claude D., Azanova I.S. // *Optics*. 2024. V. 5. P. 176–194. <https://doi.org/10.3390/opt5020013>
99. Li S., Yang X., Zhang B., Qu S., Xu Y., Liu Z., Qin Z. // *Appl. Opt.* 2024. V. 63. P. 6146–6153. <https://doi.org/10.1364/AO.529643>
100. Szczupak B., Olszewski J., Madry M., Pala P., Stefańska K., Statkiewicz-Barabach G. // *IEEE Sensors J.* 2021. V. 21. P. 20036–20044. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3095550>
101. Gifford D.K., Soller B.J., Wolfe M.S., Froggatt M.E. // *Proc. 31st European Conference on Optical Communications (ECOC 2005)*. 2005. V. 3. P. 511–512. <https://doi.org/10.1049/cp:20050584>
102. Chang Y., Liu Q., Li H., He Z. // *Opt. Lett.* 2025. V. 50. P. 5026–5029. <https://doi.org/10.1364/OL.569066>
103. Zhang A., Zhang W., Cheng L., Feng K., Dang H., Shen P. // *Infrared Laser Eng.* 2025. V. 54. Art. 20250043. <https://doi.org/10.3788/IRLA20250043>
104. Ding Z., Yao X.S., Liu T., Du Y., Liu K., Jiang J., Meng Z., Chen H. // *Opt. Express*. 2013. V. 21. P. 3826–3834. <https://doi.org/10.1364/OE.21.003826>
105. Lobach I.A., Fotiadi A.A., Yatseev V.A., Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Claude D., Kambur D.A., Belokrylov M.E., Turov A.T., Korobko D.A. // *Sensors*. 2024. V. 24. P. 5432. <https://doi.org/10.3390/s24165432>
106. Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Ponomarev R.S. // *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.* 2022. V. 11. P. 249–261. <https://doi.org/10.18178/ijeetc.11.4.249-261>

107. Qin J., Zhang L., Xie W., Cheng R., Liu Z., Wei W., Dong Y. // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 19359–19368. <https://doi.org/10.1364/OE.27.019359>
108. Belokrylov M.E., Kambur D.A., Konstantinov Y.A., Claude D., Barkov F.L. // Sensors. 2024. V. 24. P. 1253. <https://doi.org/10.3390/s24041253>
109. Wang S., Wang H., Zhang Z., Wang Y., Huang H. // Sensors. 2025. V. 25. P. 7044. <https://doi.org/10.3390/s25227044>
110. Qian X., Ji Y., Kong Y. // Appl. Opt. 2025. V. 64. P. 7357–7363. <https://doi.org/10.1364/AO.569975>
111. Li P., Fu C., Du B., He J., Zhong H., Du C., Wang L., Wang Y. // J. Lightwave Technol. 2021. V. 39. P. 6334–6339. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3092112>
112. Dittmar C., Girmen C., Gastens M., König N., Siedenburt T., Wlochal M., Schmitt R.H., Schael S. // Sensors. 2025. V. 25. P. 1187. <https://doi.org/10.3390/s25041187>
113. Loranger S., Gagne M., Lambin-Iezzi V., Kashyap R. // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 11177. <https://doi.org/10.1038/srep11177>
114. Lee J., Jung H., Kim M.J., Kim Y.H. // Sensors. 2025. V. 25. P. 5818. <https://doi.org/10.3390/s25185818>
115. Zahoor R., Vallifuoco R., Catalano E., Bernini R., Zeni L., Minardo A. // J. Lightwave Technol. 2024. V. 42. P. 1733–1739. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3326772>
116. Marcon L., Galtarossa A., Palmieri L. // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 13923–13933. <https://doi.org/10.1364/OE.27.013923>
117. Masoudi A., Newson T.P. // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 011501. <https://doi.org/10.1063/1.4939482>
118. Markom A.M., Saharudin S., Hisham M.H. // Opt. Fiber Technol. 2025. V. 94. P. 104293. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2025.104293>
119. Dandridge A., Tveten A.B., Giallorenzi T.G. // IEEE J. Quantum Electron. 1982. V. 18. P. 1647–1653. <https://doi.org/10.1109/JQE.1982.1071416>
120. Taylor H.F., Lee C.E. Apparatus and Method for Fiber Optic Intrusion Sensing. U.S. Patent No. 5,194,847, 1993.
121. Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M. // First Break. 2014. V. 32. P. 61–69. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013034>
122. Mateeva A., Lopez J., Mestayer J., Wills P., Cox B., Kiyashchenko D., Yang Z., Berlang W., Detomo R., Grandi S. // Lead. Edge. 2013. V. 32. P. 1278–1283. <https://doi.org/10.1190/tle32101278.1>
123. He X., Xu X., Zhang M., Xie S., Liu F., Gu L., Zhang Y., Yang Y., Lu H. // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 33433–33447. <https://doi.org/10.1364/OE.403263>
124. Lu Y., Zhu T., Chen L., Bao X. // J. Lightwave Technol. 2010. V. 28. P. 3243–3249. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2078798>
125. Daley T.M., Miller D.E., Dodds K., Cook P., Freifeld B.M. // Geophys. Prospect. 2016. V. 64. P. 1318–1334. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12324>

- 126.He X., Xie S., Liu F., Cao S., Gu L., Zheng X., Zhang M. // Opt. Lett. 2017. V. 42. P. 442–445. <https://doi.org/10.1364/OL.42.000442>
- 127.Masoudi A., Belal M., Newson T.P. // Meas. Sci. Technol. 2013. V. 24. P. 085204. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/8/085204>
- 128.Ghazali M.F., Mohamad H., Nasir M.Y.M., Hamzh A., Abdullah M.A., Aziz N.F.A., Thansirichaisree P., Zan M.S.D. // Opt. Fiber Technol. 2024. V. 87. P. 103911. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2024.103911>
- 129.Rao Y., Wang Z., Wu H., Ran Z., Han B. // Photonic Sens. 2021. V. 11. P. 1–30. <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0619-4>
- 130.Zhu H.-H., Liu W., Wang T., Su J.-W., Shi B. // Sensors. 2022. V. 22. P. 7550. <https://doi.org/10.3390/s22197550>
- 131.Gritsenko T.V., Chesnokov G.Yu., Koshelev K.I., Khan R.I., Stepanov K.V., Valba O.V., Chernutsky A.O., Svelto C., Zhirnov A.A., Pnev A.B., Karasik V.E. // 2023 IEEE Int. Conf. Metrology for eXtended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRAINE). 2023. P. 383–388. <https://doi.org/10.1109/MetroXRAINE58569.2023.10405703>
- 132.Turov A.T., Konstantinov Y.A., Totmina E.E., Votnova A.G., Masich G.F., Korobko D.A., Fotiadi A.A. // Sensors. 2025. V. 25. P. 2101. <https://doi.org/10.3390/s25072101>
- 133.Sun Y., Li H., Fan C., Yan B., Chen J., Yan Z., Sun Q. // Photonics. 2022. V. 9. P. 277. <https://doi.org/10.3390/photonics9050277>
- 134.Shao L., Liu S., Bandyopadhyay S., Yu F., Xu W., Wang C., Li H., Vai M.I., Du L., Zhang J. // IEEE Sensors J. 2020. V. 20. P. 6224–6239. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2939486>
- 135.Shang Y., Sun M., Wang C., Yang J., Du Y., Yi J., Zhao W., Wang Y., Zhao Y., Ni J. // Sensors. 2022. V. 22. P. 6060. <https://doi.org/10.3390/s22166060>
- 136.Juarez J.C., Taylor H.F. // Opt. Lett. 2005. V. 30. P. 3284–3286. <https://doi.org/10.1364/OL.30.003284>
- 137.Healey P. // Electron. Lett. 1984. V. 20. P. 30–32. <https://doi.org/10.1049/el:19840022>
- 138.Qin Z., Chen L., Bao X. // Opt. Express. 2012. V. 20. P. 20459–20465. <https://doi.org/10.1364/OE.20.020459>
- 139.Qin Z., Zhu T., Chen L., Bao X. // IEEE Photonics Technol. Lett. 2011. V. 23. P. 1091–1093. <https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2157337>
- 140.He H., Shao L., Li H., Pan W., Luo B., Zou X., Yan L. // IEEE Photonics J. 2017. V. 9. P. 6802610. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2700894>
- 141.Jabidin H.Z., Ibrahim S.A., Kalilur Raheem M.M., Mansoor A., Zan M.S.D., A. Bakar A.A., Abdul-Rashid H.A. // Results Eng. 2025. V. 26. Art. 105268. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105268>
- 142.Li Q., Zhang C., Li L., Zhong X. // Opt. Eng. 2014. V. 53. Art. 026106. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.2.026106>

- 143.Orlova M.V., Gritsenko T.V., Zhirnov A.A., Konstantinov Y.A., Turov A.T., Pnev A.B., Karasik V.E. // Instrum. Exp. Tech. 2023. V. 66. P. 832–836. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050202>
- 144.Juskaitis R., Mamedov A.M., Potapov V.T., Shatalin S.V. // Opt. Lett. 1992. V. 17. P. 1623–1625. <https://doi.org/10.1364/OL.17.001623>
- 145.Fang G., Xu T., Feng S., Li F. // J. Lightwave Technol. 2015. V. 33. P. 2811–2816. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2414416>
- 146.Wang Z., Zhang L., Wang S., Xue N., Peng F., Fan M., Sun W., Qian X., Rao J., Rao Y. // Opt. Express. 2016. V. 24. P. 853–858. <https://doi.org/10.1364/OE.24.000853>
- 147.Wang Y., Zhang L., Sun C., Wang C., Gui X., Fu X., Li Z. // Sensors. 2026. V. 26. Art. 1674. <https://doi.org/10.3390/s26051674>
- 148.Zhu T., Xiao X., He Q., Diao D. // J. Lightwave Technol. 2013. V. 31. P. 2851–2856. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2273553>
- 149.Qin Z., Chen L., Bao X. // IEEE Photonics Technol. Lett. 2012. V. 24. P. 542–544. <https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2182643>
- 150.Peng F., Wu H., Jia X.-H., Rao Y.-J., Wang Z.-N., Peng Z.-P. // Opt. Express. 2014. V. 22. P. 13804–13810. <https://doi.org/10.1364/OE.22.013804>
- 151.Bao X., Zhou D.-P., Baker C., Chen L. // J. Lightwave Technol. 2017. V. 35. P. 3256–3267. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2612060>
- 152.Shi Y., Wang Y., Zhao L., Fan Z. // Sensors. 2019. V. 19. Art. 3421. <https://doi.org/10.3390/s19153421>
- 153.Aktas M., Akgun T., Demircin M.U., Buyukaydin D. // Proc. SPIE. 2017. V. 10208. P. 102080G. <https://doi.org/10.1117/12.2262108>
- 154.Zhou X., Wang F., Yang C., Zhang Z., Zhang Y., Zhang X. // Sensors. 2023. V. 23. P. 7116. <https://doi.org/10.3390/s23167116>
- 155.Jezzi V.L., Loranger S., Kashyap R. // Opt. Express. 2017. V. 25. P. 32591–32601. <https://doi.org/10.1364/OE.25.032591>
- 156.Lanticq V., Bourgeois E., Magnien P., Dieleman L., Vincelas G., Sang A., Delepine-Lesoille S. // Meas. Sci. Technol. 2009. V. 20. P. 034018. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/3/034018>
- 157.Kandamali D.F., Cao X., Tian M., Jin Z., Dong H., Yu K. // Appl. Opt. 2022. V. 61. P. 2975–2997. <https://doi.org/10.1364/AO.444811>
- 158.Inaudi D., Glisic B. // J. Press. Vessel Technol. 2010. V. 132. P. 011701. <https://doi.org/10.1115/1.3062942>
- 159.Lalam N., Bukka S., Bhatta H., Buric M., Ohodnicki P., Wright R. // Commun. Eng. 2024. V. 3. P. 121. <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00274-5>
- 160.Glisic B., Inaudi D. // Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring. Wiley, 2007. <https://doi.org/10.1002/9780470517819>
- 161.Thévenaz L. // Front. Sens. 2025. V. 6. P. 1546392. <https://doi.org/10.3389/fsens.2025.1546392>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Сравнительная диаграмма основных классов распределённых волоконно-оптических сенсорных систем по основным метрологическим параметрам. Положение системы внутри треугольника отражает баланс между параметрами
- Рис. 2.** Конфигурация BOTDR: зондирующий импульс и детектирование спонтанного бриллюэновского рассеяния осуществляются с одного торца FUT через циркулятор
- Рис. 3.** Конфигурация BOTDA с двусторонним доступом: **а)** оптическая схема с отдельными каналами накачки и зондирования; **б)** спектр бриллюэновского усиления при выполнении условия резонанса (разность частот накачки и зонда равна BFS)
- Рис. 4.** Схема OFDR на основе интерферометра Маха–Цендера: вспомогательный канал компенсирует нелинейность перестройки лазера, основной канал регистрирует биения рэлеевского рассеяния FUT с опорным плечом
- Рис. 5.** Последовательность обработки рэлеевских рефлектограмм методом скользящего окна и кросс-корреляции: сдвиг пика корреляции относительно нулевой позиции пересчитывается в величину деформации и/или изменения температуры через коэффициенты K_ϵ и K_T
- Рис. 6.** Регистрация акустического воздействия DAS: высококогерентный зондирующий импульс создает интерференционный рэлеевский сигнал, чувствительный к микроскопическим изменениям оптической длины пути волокна; фазовый сдвиг $\Delta\phi$ в точке воздействия детектируется по изменению амплитуды рефлектограммы и идентифицируется по частотному спектру

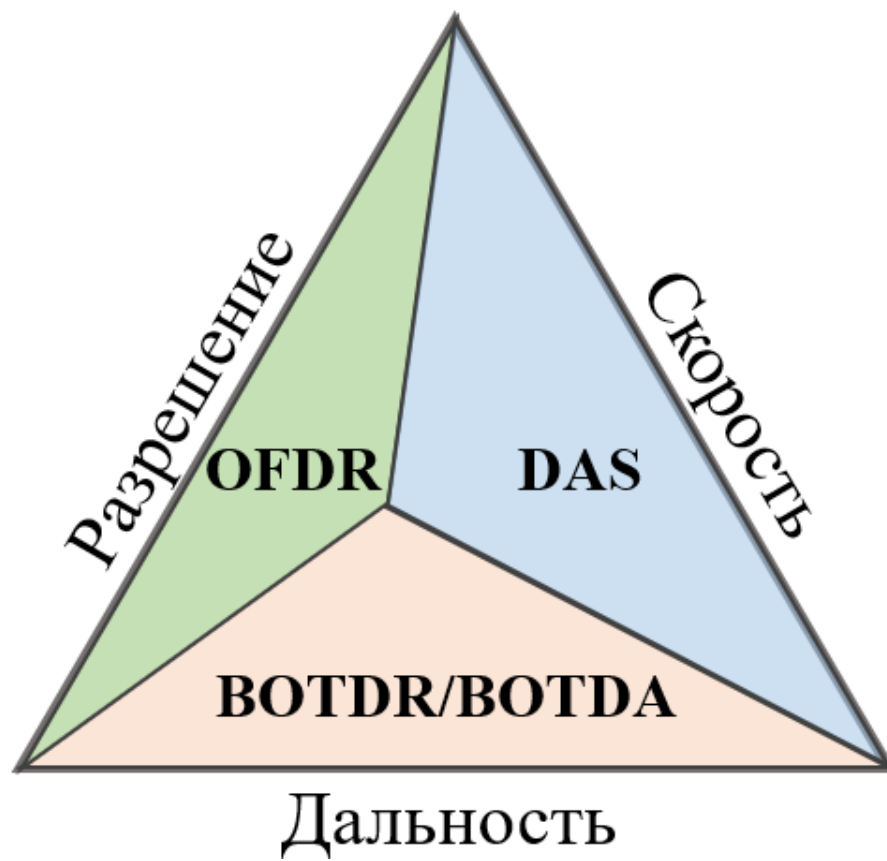


Рис. 1.

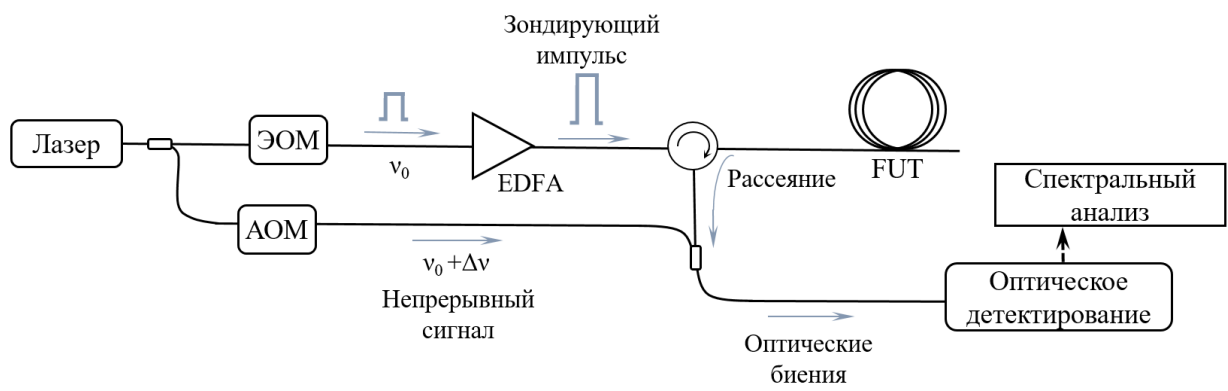


Рис. 2.

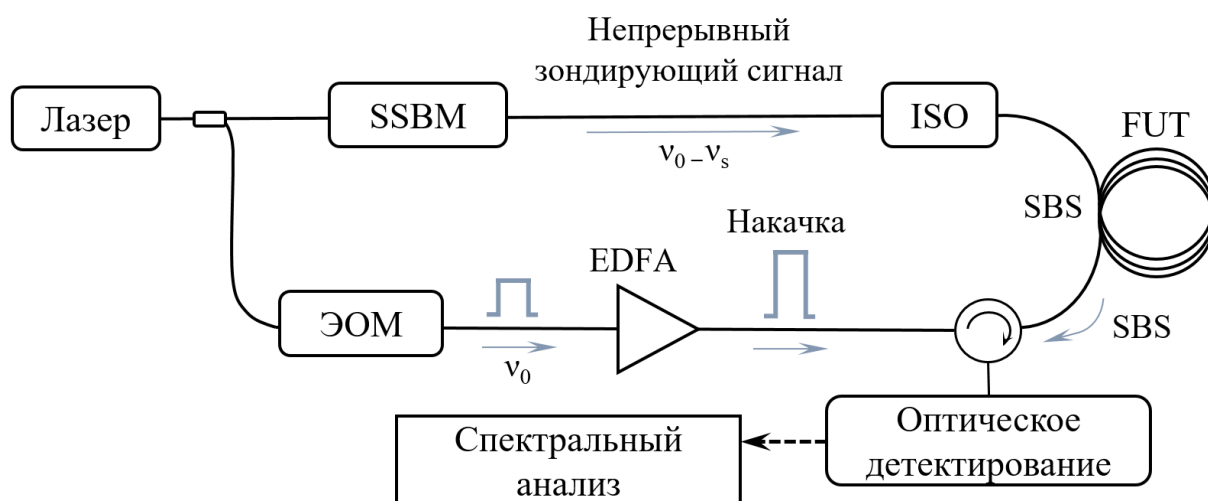
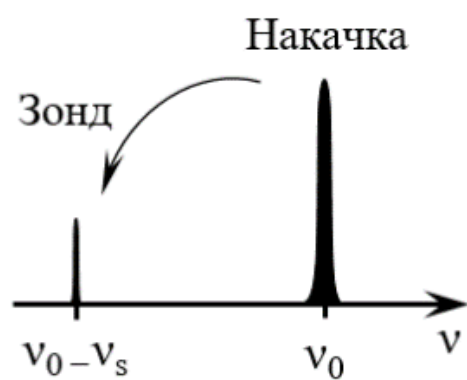


Рис. 3. (а)

До взаимодействия



После взаимодействия

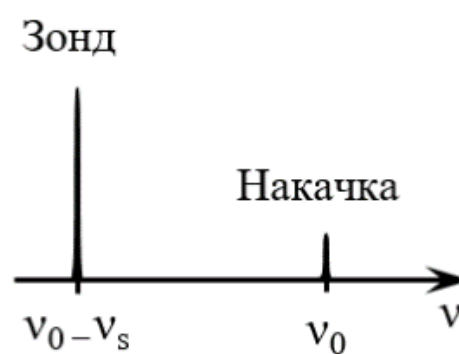


Рис. 3. (б)

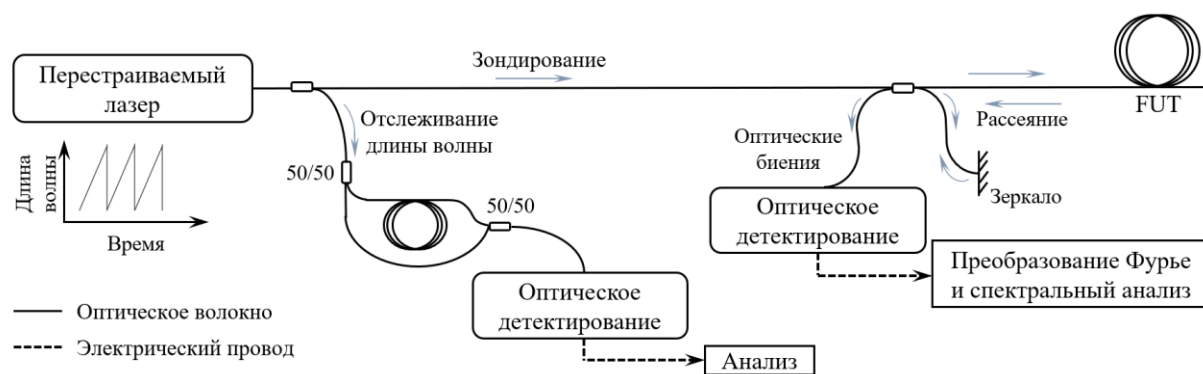


Рис. 4.

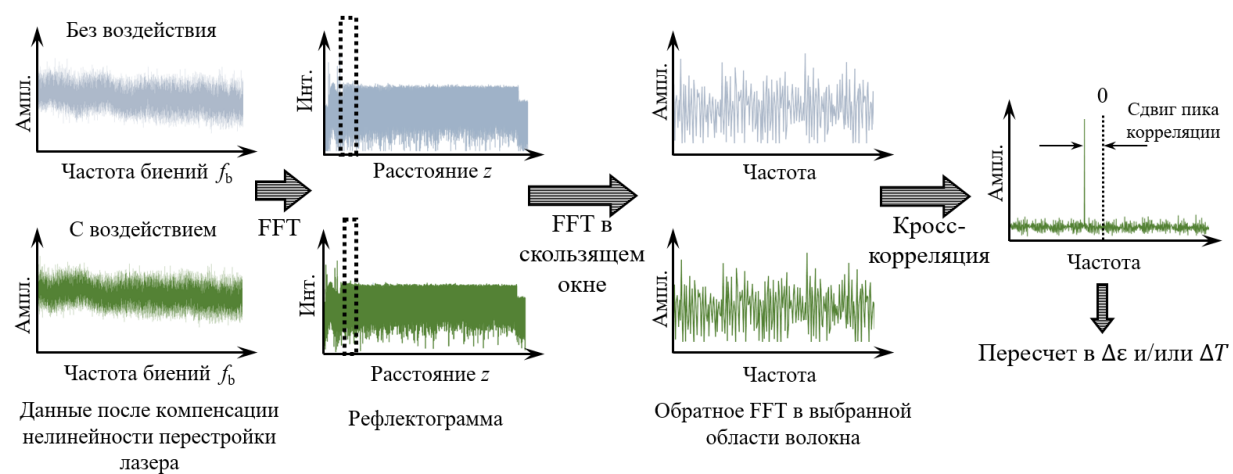


Рис. 5.

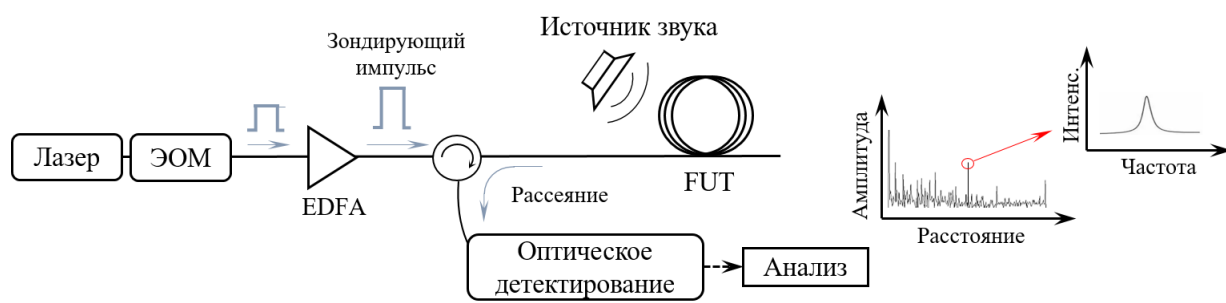


Рис. 6.