

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.586.54

МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА OFDR-ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ
ТЕСТИРОВАНИИ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПУТЕМ
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ¹

©2026 г. А.С. Лазарев^а *, Д.Е. Сороковых^а **, Н.А. Орликовский^а,
С.В. Архипов^а, А.А. Савчук^а, А.Р. Габидуллин^а, А.А. Денисов^а, и С.Г.
Рыкованов^б

^аЦентр исследовательской инфраструктуры, Сколковский институт науки и
технологий

Россия, 121205, Москва, Большой бульвар, 30, стр.1

^бЦентр искусственного интеллекта, Сколковский институт науки и технологий
Россия, 121205, Москва, Большой бульвар, 30, стр.1

*e-mail: a.lazarev@skoltech.ru

**e-mail: d.sorokovykh@skoltech.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Рассматривается задача контроля качества измерений в оптической рефлектометрии в частотной области (OFDR), используемой при тестировании фотонных интегральных схем. Предлагается метод выявления некорректных конфигураций измерительной цепи, приводящих к получению неинформативных рефлектограмм, на основе анализа их формы с применением методов машинного обучения. Сформирован размеченный набор данных, включающий корректные измерения и типичные сценарии ошибок конфигурации оптического тракта. Выполнено сравнение классических алгоритмов машинного обучения и сверточной нейронной сети в задачах бинарной и многоклассовой классификаций. Показано, что модели на основе извлекаемых признаков обеспечивают высокую точность выявления некорректных измерений и позволяют определять вероятный тип ошибки. Предложенный подход реализован в виде программной утилиты для оперативной оценки качества измерений, он может быть использован в составе систем автоматизированного тестирования.

Ключевые слова: оптическая рефлектометрия, машинное обучение, интегральная фотоника.

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптическая рефлектометрия в частотной области (OFDR) является одним из ключевых методов характеристики фотонных интегральных схем (ФИС) [1], позволяющим получать информацию о потерях и отражениях, распределенных вдоль оптического тракта. Применение OFDR в задачах тестирования и отладки ФИС [2]

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

обеспечивает возможность анализа как отдельных функциональных элементов, так и всего оптического пути. При этом достоверность получаемых данных существенно зависит от корректности конфигурации измерительной цепи.

На практике рефлектограммы содержат вклад не только от исследуемого устройства, но и от всех элементов измерительного тракта [3-5], включая оптические волокна, разъемы, переключатели и зонды. Ошибки сборки или конфигурации цепи приводят к появлению искаженных или неинформативных измерений. Выявление таких случаев, как правило, выполняется оператором вручную на основе анализа формы рефлектограммы, что усложняет проведение серийных измерений и ограничивает степень автоматизации экспериментальных процедур.

Существующие подходы к автоматизации анализа рефлектометрических данных в основном основаны на пороговых или эвристических методах [6], чувствительных к вариациям сигнала и плохо обобщающихся на различные экспериментальные конфигурации. В связи с этим представляет интерес применение методов машинного обучения и нейронных сетей [7-10] для автоматизированного анализа измерений.

В настоящей работе предлагается метод контроля качества OFDR-измерений, направленный на выявление некорректных конфигураций измерительной цепи при тестировании фотонных интегральных схем. Метод основан на анализе формы рефлектограмм с использованием моделей машинного обучения и реализован в виде программной утилиты для оперативной оценки корректности измерений. Рассматриваются задачи бинарной классификации измерений по признаку корректности, а также идентификации наиболее вероятного типа ошибки конфигурации.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

2.1. Характерные типы рефлектограмм и дефектов измерительной цепи

Рефлектограмма, получаемая методом OFDR, представляет собой распределение амплитуды отраженного сигнала вдоль оптического тракта. В общем случае измеряемый сигнал может быть представлен в виде суперпозиции вкладов от отдельных отражающих неоднородностей:

$$R(z) = \sum_i A_i \delta(z - z_i) + n(z), \quad (1)$$

где A_i - амплитуда отражения от i -го элемента, z_i - его положение вдоль тракта, $n(z)$ - шумовая составляющая.

Форма рефлектограммы определяется конфигурацией измерительной цепи. При корректном измерении сигнал содержит характерный пик, соответствующий вводу

излучения в исследуемое устройство, а также структурированную часть, отражающую его внутреннюю топологию.

На основе экспериментальных данных были выделены три основных типа дефектов измерительной цепи, приводящих к некорректным рефлектограммам:

- отсутствие подключения рефлектометра к оптическому тракту;
- некорректная конфигурация оптического переключателя;
- отсутствие ввода излучения в исследуемое устройство.

Первые две группы дефектов характеризуются устойчивыми и воспроизводимыми признаками, тогда как третья группа обладает значительно большей вариативностью. Примеры характерных рефлектограмм для корректного измерения и различных типов дефектов приведены на рис. 1.

Рис. 1. Характерные рефлектограммы для различных состояний измерительной цепи

Таким образом, задача контроля качества измерений может быть сформулирована как задача классификации функции $R(z)$ по признаку корректности измерения и типу дефекта измерительной цепи.

Обобщенная схема работы предлагаемого метода в составе программного обеспечения для контроля качества измерений приведена на рис. 2. Она включает этап получения рефлектограмм, оценку корректности измерения с использованием модели машинного обучения и последующую классификацию типа дефекта в случае обнаружения некорректного измерения.

Рис. 2. Схема работы метода контроля качества OFDR-измерений в составе программного обеспечения

2.2. Модели машинного обучения для классификации рефлектограмм

Для автоматизированной классификации рефлектограмм использовались методы машинного обучения, основанные на представлении сигнала в виде вектора признаков. Каждой рефлектограмме $R(z)$ сопоставляется вектор признаков

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n], \quad (2)$$

где компоненты x_i характеризуют статистические и структурные свойства сигнала.

В работе рассматривались логистическая регрессия (LR) и ансамблевый метод на основе решающих деревьев — случайный лес (RF). Логистическая регрессия использует модель вида

$$P(y = 1|\mathbf{x}) = \frac{1}{1 + e^{-(\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b)}}, \quad (2)$$

где $\mathbf{w}$ – вектор лесов, b – смещение.

Случайный лес представляет собой ансамбль решающих деревьев, в котором итоговое решение определяется голосованием отдельных моделей. Сравнительный анализ показал, что модель случайного леса обеспечивает более высокое качество классификации по сравнению с логистической регрессией, особенно в условиях вариативности сигналов, характерной для дефектов оптического тракта. В связи с этим случайный лес был выбран в качестве основной модели.

В ходе исследования также рассматривалась сверточная нейронная сеть для непосредственного анализа одномерного сигнала $R(z)$. Однако при имеющемся объеме обучающей выборки использование нейронной сети не привело к улучшению качества классификации по сравнению с моделями, основанными на извлекаемых признаках.

2.3. Извлечение признаков из рефлектограмм

Для построения признакового описания рефлектограмм использовались агрегированные характеристики амплитуды сигнала вдоль оптического тракта. В качестве базового набора были рассмотрены статистические моменты и квантильные оценки (среднее значение, медиана, межквартильный размах, верхние квантили), а также интегральные характеристики распределения энергии сигнала по протяженности (полная энергия, энергия в заданных долях длины, относительная энергия в центральной и крайних частях сигнала).

Дополнительно вычислялись простые структурные признаки, отражающие положение и выраженность сильнейших отражающих неоднородностей: положение глобального максимума (в нормированных координатах), максимальное значение сигнала, динамический диапазон, максимальное и среднее по трассе изменения амплитуды. Такой набор признаков позволяет компактно описывать глобальную форму рефлектограммы, он чувствителен к типовым дефектам измерительной цепи, таким как отсутствие ввода в устройство, неверное состояние оптического переключателя или разрыв оптического тракта.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И СБОР ДАННЫХ

Экспериментальные данные были получены на измерительной установке, предназначенной для тестирования фотонных интегральных схем. Установка включала OFDR-рефлектометр, систему позиционирования оптических зондов и оптический переключатель для коммутации измерительных каналов.

Принцип работы OFDR основан на регистрации интерференционного сигнала между опорным и отраженным излучениями с последующим преобразованием из частотной области во временную с использованием преобразования Фурье, что позволяет получить распределение отражений вдоль оптического тракта.

Управление измерениями и сбор данных осуществлялись с помощью специализированного программного обеспечения. На этапе формирования данных использовался режим децимации, реализованный на уровне измерительного прибора, что позволяло получать рефлектограммы фиксированной длины.

В результате экспериментов был сформирован набор данных, включающий 582 рефлектограммы, из которых 479 соответствуют корректным измерениям, а 103 - некорректным.

Распределение некорректных измерений по типам дефектов представлено на табл. 3.

Для учета несбалансированности классов при обучении модели применялось взвешивание классов пропорционально обратной величине их частоты в выборке. Такой подход повышает относительный вклад некорректных измерений при построении решающих правил и снижает риск игнорирования малочисленного класса при сохранении высокой точности на большинстве данных.

Для проверки работоспособности предложенного метода была разработана программная система, обеспечивающая получение рефлектограмм от измерительного прибора, их обработку и классификацию в графическом интерфейсе. Проверка проводилась на измерениях, не входивших в обучающую выборку, она показала корректное выявление некорректных измерений и их классификацию по типам дефектов.

Пример пользовательского интерфейса разработанной программной системы приведен на рис. 3.

Рис. 3. Интерфейс программной системы для контроля качества OFDR-измерений

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБУЧЕНИЕ

4.1. Результаты бинарной классификации

Качество бинарной классификации оценивалось с использованием стандартных метрик: ассигасу, F1 и ROC-AUC. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты бинарной классификации

Модель	Accuracy	F1	ROC – AUC
Случайный лес (RF)	0.986	0.960	0.996
Логистическая регрессия (LR)	0.911	0.764	0.951

Как видно из табл. 1, модель случайного леса демонстрирует существенно более высокие показатели качества по сравнению с логистической регрессией. Это свидетельствует о наличии нелинейных зависимостей в пространстве признаков, определяющих корректность измерения.

4.2. Результаты многоклассовой классификации

Результаты многоклассовой классификации по типам дефектов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты многоклассовой классификации

Модель	Accuracy	F1 (macro)	F1 (weighted)
Случайный лес (RF)	0.971	0.963	0.968
Логистическая регрессия (LR)	0.961	0.930	0.959

Высокие значения метрик показывают, что предложенный подход позволяет не только выявлять некорректные измерения, но и классифицировать тип дефекта измерительной цепи.

4.3. Анализ значимости признаков

Для анализа работы модели была выполнена оценка значимости признаков в модели случайного леса. Наиболее информативные признаки для задач бинарной и многоклассовой классификаций приведены в табл. 3.

Таблица 3. Наиболее значимые признаки для бинарной и многоклассовой классификаций

Признак	Бинарная	Многоклассовая
Среднее абсолютное изменение сигнала	0.152	0.035
Квантиль 0.75	0.095	0.048
Энергия первой половины сигнала	0.094	0.052
Положение максимума (нормированное)	0.093	0.120
Максимальное значение сигнала	0.043	-
Максимальное изменение сигнала	0.043	-
Среднее значение сигнала	0.040	-
Полная энергия сигнала	0.035	-
Межквартильный размах	-	0.147

Относительная энергия средней части сигнала	-	0.124
Относительная энергия первой четверти сигнала	-	0.053
Медиана сигнала	-	0.038

Анализ показывает, что наиболее значимыми являются признаки, характеризующие распределение энергии сигнала и положение отражающих пиков вдоль оптического тракта.

4.4. Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что задача контроля качества OFDR-измерений определяется в первую очередь глобальными характеристиками сигнала, такими как распределение энергии и положение максимума, а не локальными особенностями формы сигнала.

Модель случайного леса демонстрирует устойчивость к вариациям формы сигнала, характерным для дефектов оптического тракта, и обеспечивает высокую точность классификации как в бинарной, так и в многоклассовой постановке задачи.

Практическая проверка метода на независимых измерениях показала его работоспособность при анализе данных, получаемых непосредственно с измерительного прибора, что подтверждает возможность использования предложенного подхода для оперативного контроля качества OFDR-измерений.

Реализация метода в виде программной утилиты основана на предварительном вычислении признаков и применении обученной модели случайного леса, что обеспечивает малую вычислительную сложность. Быстродействие разработанной программной системы оценивалось на наборе данных, использовавшемся в ходе обучения и тестирования моделей. Среднее время полной обработки одной рефлектограммы, включая загрузку данных, извлечение признаков и выполнение классификации, составило 58.9 мс, медианное значение - 48.9 мс. Даже в наихудшем случае время обработки не превышало 170 мс на рабочей станции с процессором Intel Core i5-1135G7 и объемом ОЗУ 16 Гб, что существенно меньше времени выполнения единичного измерения OFDR-рефлектометром (10-15 с). Это позволяет выполнять оценку качества измерения в режиме, близком к реальному времени, без ограничения пропускной способности измерительной установки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод контроля качества OFDR-измерений, предназначенный для выявления некорректных конфигураций измерительной цепи при

тестировании фотонных интегральных схем. Метод основан на анализе формы рефлектограмм с использованием моделей машинного обучения.

Показано, что наиболее информативными являются признаки, характеризующие распределение энергии сигнала, положение отражающих пиков и вариации амплитуды вдоль оптического тракта. Наилучшие результаты продемонстрировала модель случайного леса, обеспечившая высокую точность как в задаче бинарной классификации корректных и некорректных измерений, так и в задаче определения типа дефекта измерительной цепи.

Сравнение с одномерной сверточной нейронной сетью показало, что при рассматриваемом объеме данных использование более сложных моделей не приводит к существенному повышению качества классификации. Это указывает на то, что задача в значительной степени определяется глобальными характеристиками рефлектограммы и эффективно решается с помощью признакового описания сигнала.

Разработанная на основе предложенного метода программная утилита, взаимодействующая с измерительным прибором, показала работоспособность на независимых экспериментальных данных. Полученные результаты подтверждают возможность применения предложенного подхода для оперативного контроля качества OFDR-измерений и снижения объема ручной валидации в экспериментальных исследованиях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы утверждают отсутствие конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллег из Центра Исследовательской Инфраструктуры Сколтеха за поддержку экспериментальных работ и обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuksel K., Wuilpart M., Moeyaert V., and Megret P. Optical frequency domain reflectometry: A review, Proc. 11th Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON) (2009). <https://doi.org/10.1109/ICTON.2009.5185111>.
2. Liu Z., Zhu D., Raju L., and Cai W. Tackling photonic inverse design with machine learning, Adv. Sci. 8 (5), 2002923 (2021). <https://doi.org/10.1002/advs.202002923>.
3. Belokrylov M.E., Claude D., Konstantinov Yu.A., Karnaushkin P.V., Ovchinnikov K.A., Krishtop V.V., Gilev D.G., Barkov F.L., and Ponomarev R.S. Method for increasing the signal-to-noise ratio of Rayleigh back-scattered radiation registered by a frequency domain

- optical reflectometer using two-stage erbium amplification. *Instrum. Exp. Tech.* 66 (5), 56–63 (2023). <http://doi.org/10.1134/S0020441223050172>.
4. *Bisyarin M., Kotov O., Liokumovich L., and Ushakov N.* Relationship between temporal and spatial reflectogram scales in fiber optical time domain reflectometry systems, *Optical Memory and Neural Networks*. 22, (2013). <http://doi.org/10.3103/S1060992X1302001X>.
 5. *Lobach I.A., Fotiadi A.A., Yatseev V.A., Konstantinov Yu.A., Barkov F.L., Claude D., Kambur D.A., Belokrylov M.E., Turov A.T., and Korobko D.A.* Newest methods and approaches to enhance the performance of optical frequency-domain reflectometers, *Sensors* 24 (16), 5432 (2024). <http://doi.org/10.3390/s24165432>.
 6. *Zhu T., Lin C., Yang J., Yu Z., Xu P., Wen K., Wang Y., and Qin Y.* Improve accuracy and measurement range of sensing in km-level OFDR using spectral splicing method, *Opt. Express*. 31 (13), 20980–20993 (2023). <http://doi.org/10.1364/OE.488380>.
 7. *Yin G., Zhu Z., Liu M., Wang Y., Liu K., Yu K., and Zhu T.* Optical frequency domain reflectometry based on multilayer perceptron, *Sensors* 23 (6), 3165 (2023). <http://doi.org/10.3390/s23063165>.
 8. *Rutigliano D., Boracchi G., Invernizzi P., Sozio E., Alippi C. and Binetti S.* Event-detection deep neural network for OTDR trace analysis, *Image Analysis and Processing (ICIAP)* (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-030-80568-5_16.
 9. *Rizzo A.M., Magri L., Rutigliano D., Invernizzi P., Sozio E., Alippi C., Binetti S., and Boracchi G.* Known and unknown event detection in OTDR traces by deep learning networks. *Neural Comput. Appl.* 34 (22), 19655–19673 (2022). <http://doi.org/10.1007/s00521-022-07634-2>.
 10. *Zhang R., Luan T., Li S., Wang C., and Zhang A.* Enhancing signal recognition accuracy in delay-based optical reservoir computing: A comparative analysis of training algorithms. *Electronics* 13 (11), 2202 (2024). <http://doi.org/10.3390/electronics13112202>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Характерные рефлектограммы для различных состояний измерительной цепи: **а)** корректное измерение; **б)** отсутствие ввода в фотонную интегральную схему; **в)** излучение в открытый порт; **г)** неверный канал оптического переключателя
- Рис. 2.** Схема работы метода контроля качества OFDR-измерений в составе программного обеспечения
- Рис. 3.** Интерфейс программной системы для контроля качества OFDR-измерений

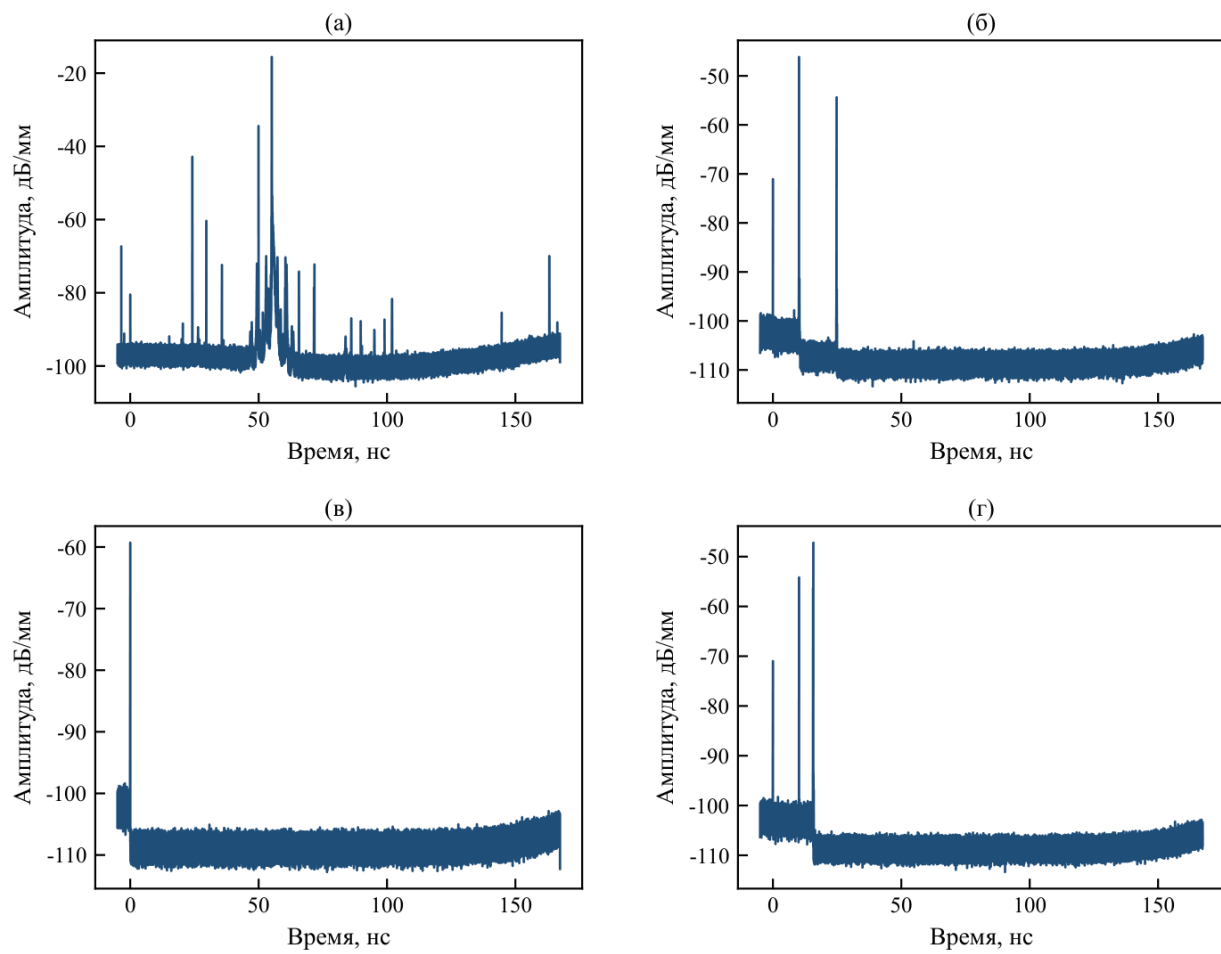


Рис. 1.



Рис. 2.

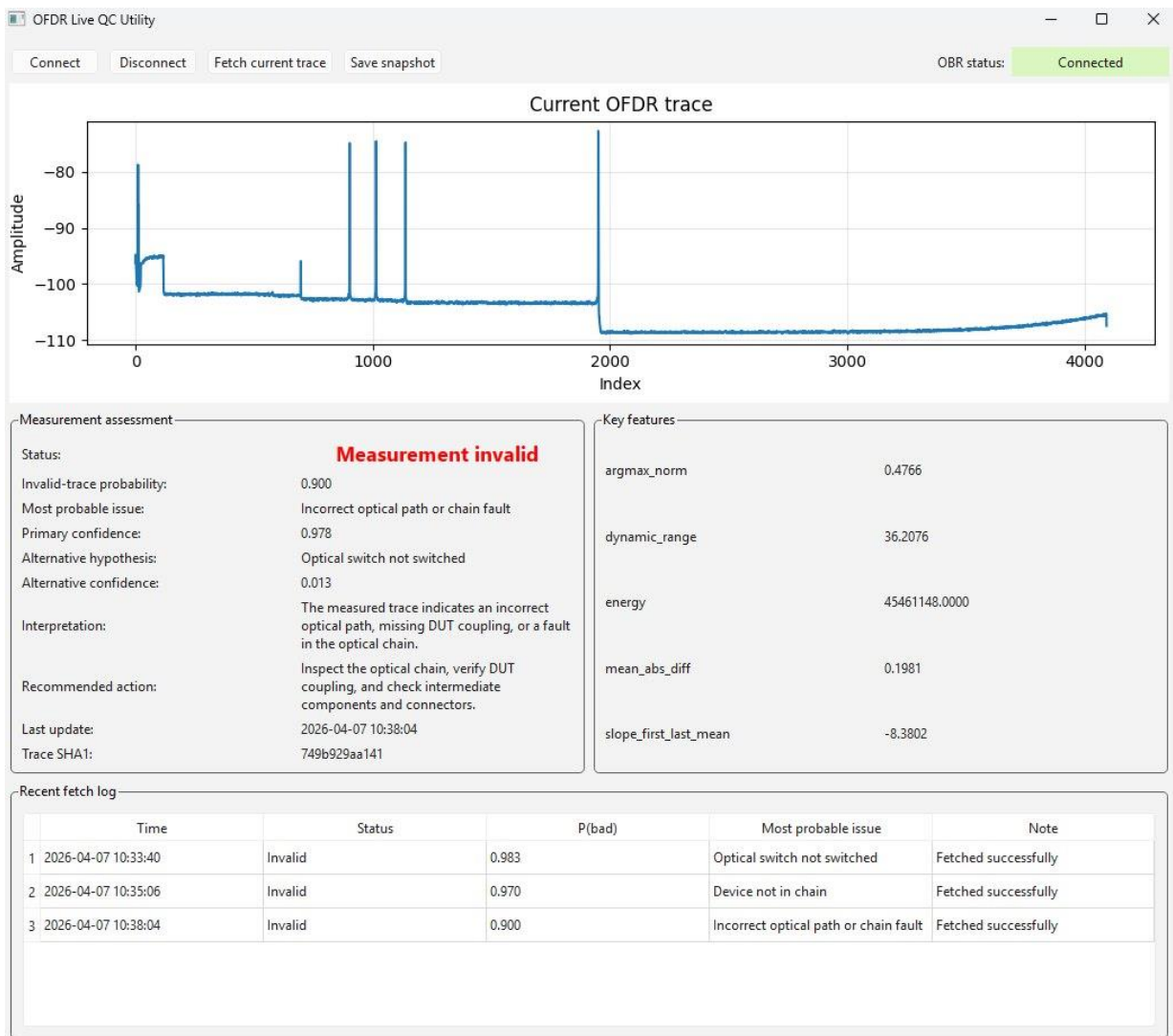


Рис. 3.