

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 681.2.084

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ
ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВОЛОКОННЫЙ СЕНСОР ПРИ
ПОМОЩИ ОПТИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА ЧАСТОТНОЙ
ОБЛАСТИ С МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ РЕФЕРЕНСНЫХ
КАНАЛОВ**

©2026 г. Д. А. Камбур^{a,b,*}, Ю. А. Константинов^a, Д. Клод^a,
М. Е. Белокрылов^{a,c}, Е. Е. Тотмина^{a,b}, Ф. Л. Барков^a

^aПермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук
Россия, 614990, Пермь, ул. Ленина, 13а

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

^cООО “ОРМС Лаб”
Россия, 614039 Пермь, Комсомольский проспект, 69

*e-mail: kambur.dima@gmail.com

Поступила в редакцию 23.07.2025 г.

После доработки 29.09.2025 г.

Принята к публикации 15.01.2026 г.

Описан подход к модификации конфигурации оптического частотного рефлектометра путем замены двух специальных сервисных каналов, включающих вспомогательный интерферометр и газовую ячейку, на один канал. В такой конфигурации были изучены сенсорные характеристики системы. Для извлечения полезной информации использовались методы цифровой фильтрации. Показано, что представленный метод позволяет избежать использования лишнего канала аналого-цифрового преобразователя и фотодетектора, при этом рефлектограмма и корреляционные функции восстанавливаются алгоритмом равночастотной передискретизации без потери информации.

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределенные волоконно-оптические датчики (РВОД) используются для измерения различных физических параметров, таких как температура, давление, вибрация, деформация,

влажность и т.д. [1–4]. Они представляют собой систему, состоящую из волоконно-оптического кабеля (иногда на базе специальных волокон [5]), воспринимающего внешние воздействия, а также источника излучения, различных активных и пассивных оптических компонентов, включая фильтры и приемно-передающие устройства. Применение РВОД возможно в различных областях: РВОД используются для контроля температуры, давления, вибрации и других параметров, которые могут повлиять на производственные процессы [6–9]. Например, в нефтедобывающей промышленности РВОД могут использоваться для измерения температуры и давления в скважинах, что позволяет контролировать процесс добычи нефти; кроме того, РВОД используются для мониторинга дорог, мостов, тоннелей и ответственных инженерных сооружений [10, 11]. Распределенные волоконно-оптические датчики также используются для обнаружения угроз и предотвращения террористических актов, для обнаружения проникновения злоумышленников и беспилотных устройств на охраняемые территории [12, 13]. В целом РВОД являются эффективным инструментом для измерения физических параметров и контроля технологических процессов в различных отраслях промышленности, конструкторских работах, при изучении новых материалов и их свойств.

Одной из ключевых характеристик распределенных волоконно-оптических датчиков является их пространственное разрешение. Системы, которые демонстрируют наилучшее пространственное разрешение по длине оптического сенсора, основаны на принципах оптической рефлектометрии частотной области (OFDR). В таких системах сенсорная линия зондируется при помощи узкополосного лазера, длина волны которого меняется во времени по линейному закону. Основной интерферометр подобных рефлектометрических инструментов устроен таким образом, что частота интерференционных биений обратно-рассеянного излучения пропорциональна пространственной координате в оптическом волокне, а информация о физических воздействиях, например температурах и деформациях, содержится и в амплитудном, и в фазовом спектрах. Для корректировки линейности частотной перестройки и мониторинга стартовой длины волны в оптической рефлектометрии частотной области используются два референсных канала: один содержит вспомогательный интерферометр, другой – газовую ячейку. Наши предыдущие исследования показали, что среди прочих удешевляющих аппаратных модификаций OFDR [14] объединение каналов вспомогательного интерферометра и газовой ячейки в один канал вполне работоспособно и обеспечивает визуализацию рефлектограмм без потери пространственного разрешения [15]. Сначала сигналы объединялись путем физического слияния каналов, потом сигнал обрабатывался методом частотной фильтрации или при помощи эмпирической модовой

декомпозиции; данные методы позволили восстановить амплитудный спектр двух искомым сигналов. Тем не менее на вопрос, влияют ли подобные преобразования на возможность восстановления сенсорной информации, по нашей информации, нет ответа. В настоящем исследовании мы постараемся на него ответить, сравнивая две схемы оптического рефлектометра (традиционную и модифицированную) и нагружая оптический сенсор при помощи продольного растяжения заданной силы.

Стратегия на уменьшение количества вспомогательных оптоэлектронных каналов, детекторов и каналов аналого-цифрового преобразования несет существенную экономическую выгоду, когда речь идет о рефлектометре частотной области, не имеющем в своей конструкции перестраиваемого лазера и работающем с внешним источником излучения. Такой принцип успешно реализует компания Santec [16]. В этом случае основную стоимость устройства составляют детекторы и аналого-цифровые преобразователи, поэтому эффект от внедрения предложенного авторами в настоящей работе подхода может в итоге быть выражен в снижении общей себестоимости использованных компонентов на четверть или даже на треть. В нашей предыдущей работе [15] была произведена та же самая модификация аппаратной части рефлектометра с совмещением каналов газовой ячейки и вспомогательного интерферометра. Разница заключается в том, что в предыдущей работе исследовалась точность определения позиции события по длине волокна, в то время как в настоящей статье проводится сравнение точности получения физического воздействия на примере контролируемой продольной деформации оптического волокна.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Первая (классическая) модификация установки выглядела следующим образом: излучение перестраиваемого лазерного источника Santec TSL-570-P-480640-P-F-AP-00-1 при помощи волоконных каплеров (все каплеры, поляризационные делители и циркуляторы произведены компанией AFR) делилось на три направления таким образом, как показано на рис. 1.

Рис. 1. Первая вариация экспериментальной установки

Часть излучения (95% от его интенсивности) отправлялась на основной интерферометр, который состоял из двух делителей и циркулятора. Циркулятор направлял излучение в волоконный сенсор, где, рассеиваясь на мелких неоднородностях в каждой пространственной координате, оно возвращалось назад и интерферировало в одном из делителей с порцией исходного сигнала. После этого излучение отправлялось на поляризационный делитель, где две его поляризационные компоненты выделялись и

отправлялись на два фотодетектора (все фотодетекторы в схеме – компании Femto, марки HSA-S-200M). Еще одна порция излучения после прохождения через циркулятор отправлялась на ацетиленовую газовую ячейку Wavelength References (50 мторр), после которой поступала на фотодетектор. Третья порция зондирующего излучения отправлялась на вспомогательный интерферометр, в одно из плеч которого было встроено стандартное одномодовое оптическое волокно SMF-28 длиной 50 м. Для эффективной работы метода равночастотной передискретизации, необходимого для восстановления рефлектограммы с высоким разрешением, длина линии задержки должна превышать длину исследуемой линии. Поскольку эталоном для метрологических измерений в данной схеме выступает газовая ячейка (расстояние на рефлектограмме вычисляется, исходя из точных значений длины волны излучения в начале и конце перестройки), прецизионный контроль длины линии задержки вспомогательного интерферометра не требуется. Отражаясь от двух зеркал FOFM-15-L-1-2 компании AFW, излучение из плеч вспомогательного интерферометра интерферирует и поступает также на фотодетектор. Сбор данных со всех каналов осуществлялся платой сбора данных Advantech 12 bit с частотой дискретизации 25 МГц.

Вторая вариация установки (рис. 2) отличалась тем, что ацетиленовая газовая ячейка не была подключена к отдельному детектору, а располагалась сразу на выходе циркулятора вспомогательного интерферометра.

Рис. 2. Вторая вариация экспериментальной установки

В качестве исследуемой линии использовался образец из стандартного одномодового оптического волокна SMF-28 длиной 30 м. На двух участках длиной 15 см исследуемой линии (в начале и конце) создавалась деформация растяжения с помощью балки равного сопротивления, у которой во всех сечениях наибольшее нормальное напряжение одинаково. Участки были зафиксированы цианокрилатным клеем, балка последовательно нагружалась 13 калиброванными грузами (рис. 3). Параметры используемой балки: $l = 0.375$ м, $h = 0.003$ м, $b_0 = 0.239$ м, $E = 1.93 \cdot 10^{11}$ Па.

Изгибающий момент балки линейно зависит от приложенной силы F , потому деформации на поверхности консоли постоянны по длине и могут быть вычислены по формуле

$$\varepsilon_z = \frac{6l}{Eb_0h^2} F, \quad (1)$$

где F [Н] – значение приложенной силы, l [м] – длина балки, b_0 [м] – ширина балки, h [м] – толщина балки, E [Па] – модуль упругости материала балки.

Рис. 3. Балка равного сопротивления

3. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Перед тем, как получить спектры и их взаимнокорреляционные функции (ВКФ), необходимо подготовить данные, полученные в ходе эксперимента на второй вариации установки, поскольку на ней два референсных канала были объединены в один, а для дальнейших расчетов они необходимы отдельно друг от друга. В предыдущей работе [15] мы использовали эмпирическую модовую декомпозицию и частотную фильтрацию. Оба метода продемонстрировали схожую эффективность, при этом параметры частотной фильтрации устанавливались, исходя из разумных предположений о наборах частот, присутствующих в сигналах обоих каналов, в то время как при использовании эмпирической модовой декомпозиции не было найдено оптимальных критериев для мод, необходимых для восстановления исходного сигнала. Кроме этого, оптимизированная частотная фильтрация продемонстрировала гораздо меньшие требования к вычислительным ресурсам и была выполнена за меньший временной промежуток [15]. Исходя из этих критериев, в настоящем исследовании мы использовали только частотную фильтрацию.

Для извлечения сигнала вспомогательного интерферометра применялись фильтры верхних частот (ФВЧ) с конечной импульсной характеристикой, каждый с собственным значением частоты среза. Такой подход обусловлен необходимостью обеспечить линейность фазочастотной характеристики и сохранить корреляцию между фазовыми помехами в полезном сигнале и сигнале, поступающем от вспомогательного интерферометра.

Чтобы оценить точность выделения сигнала вспомогательного интерферометра, мы провели серию испытаний с применением цифровой фильтрации на разных частотах среза. Качество выделения сигнала оценивалось по возможности определения фазы с помощью преобразования Гильберта, которое дополняет сигнал мнимой компонентой той же частоты и амплитуды, но смещенной по фазе на четверть периода. Фазу однокомпонентного сигнала можно получить, вычислив арктангенс отношения мнимой и действительной частей сигнала. Для многокомпонентного сигнала результат преобразования не несет однозначной информации о фазе, поэтому критерием качественного разделения служило отсутствие фазовых замираний в моменты времени, когда амплитуда сигнала снижалась из-за соответствия длины волны излучения пику поглощения газовой ячейки. В ходе эксперимента частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя была установлена на уровне 25 МГц. Иллюстративным примером амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ) фильтров, использованных в эксперименте, служит изображение на рис. 4. Как видно, ФЧХ фильтра в полосе пропускания является линейной.

Рис. 4. Пример АЧХ и ФЧХ рассматриваемого фильтра для частоты среза 5 МГц

Частота среза используемого фильтра высоких частот (ФВЧ) была выбрана на один порядок ниже средней частоты интерференционных биений вспомогательного интерферометра, она составляла 100 кГц, ослабление в полосе подавления было выбрано равным 60 дБ, исходя из разрядности АЦП 16 бит. Фильтр применялся к сигналу объединенного канала, после чего выделенный сигнал вспомогательного интерферометра поступал на вход функции равночастотной дискретизации (рис. 5).

Рис 5. Схематичное изображение процесса выделения сигнала вспомогательного интерферометра с помощью фильтра высоких частот

После равночастотной передискретизации сигнала с основного интерферометра вычисляется прямое преобразование Фурье. Далее вычисляются обратные преобразования Фурье в скользящем окне без перекрытий для растянутого и неподвижного волокон:

$$I_z(t, \nu) = \Phi_\nu^{-1}\{[R(t, x)]_z\}, \quad (2)$$

где z – размер окна сканирования в отсчетах; R — значение интенсивности в точке спектра с координатой x в момент времени t ; ν – оптическая частота; Φ_ν^{-1} – обратное преобразование Фурье. Эти данные поступают на вход нормализованной ВКФ для опорного и измерительного спектров, которая имеет характерный пик,

$$\Psi_z(t_d, t_r) = \frac{I'_z(t_d, \nu)}{S(I'_z(t_d, \nu))} \otimes \frac{I'_z(t_r, \nu)}{S(I'_z(t_r, \nu))}, \quad (3)$$

где \otimes обозначает свертку; индексы d и r обозначают “возмущение” и “покой” соответственно; S – стандартное отклонение;

$$I'_z(t_d, \nu) = I_z(t_d, \nu) - \bar{I}_z(t_d, \nu),$$

где $\bar{I}_z(t_d, \nu)$ – среднее значение массива данных $I_z(t_d, \nu)$;

$$I'_z(t_r, \nu) = I_z(t_r, \nu) - \bar{I}_z(t_r, \nu),$$

где $\bar{I}_z(t_r, \nu)$ – среднее значение массива данных $I_z(t_r, \nu)$. Частотная координата этого пика выражается следующим образом:

$$\Omega_r^d = \text{find max}(\Psi_z(t_d, t_r)), \quad (4)$$

где findmax возвращает аргумент максимального значения функции $\Psi_z(t_d, t_r)$. Величина Ω_r^d пропорциональна разности фаз сигнала $\Delta\phi$, а также температурам и деформациям, действующим на оптическое волокно в определенной локации:

$$\Omega_r^d = K_\varepsilon \Delta\varepsilon_r^d + K_T \Delta T_r^d, \quad (5)$$

где K_ε и K_T – коэффициенты пропорциональности для деформаций и температур соответственно. Весь процесс обработки сигнала представлен на рис. 6.

Рис.6. Алгоритм обработки данных с двух установок...

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После описанной выше обработки полученные в экспериментах данные представляют собой одномерные массивы, характеризующие сдвиг взаимнокорреляционной функции между спектрами обратного рассеяния для нагруженного и свободного состояний в каждой точке оптического волокна. На каждой рефлектограмме выделяются две зоны воздействия, поскольку два фрагмента волоконного сенсора были приклеены к балке равного сопротивления. Кроме этого, каждая рефлектограмма была получена для двух состояний поляризации – S и P. Таким образом, в экспериментах с обеими вариациями установок для каждого нагруженного состояния в нашем распоряжении было четыре набора данных. Один из таких наборов данных представлен на рис. 7. Размер окна вычисления корреляции составляет 1500 отсчетов (4 см). Необходимо отметить, что в данных экспериментах мы не исследуем точность локализации воздействий, поскольку возможная погрешность не будет превышать размера окна вычисления корреляции, а вот корректность определения самой величины воздействия необходимо еще доказать.

Рис. 7. Воздействие на сенсор (с пространственным усреднением по 4 отсчетам)

Поскольку во время эксперимента в лабораторном помещении могла варьироваться температура, также оказывающая влияние на сдвиг корреляционной функции спектров обратного рассеяния, сдвиги ВКФ на фрагментах волокна слева и справа от приклеенного на балку отрезка использовались для температурной компенсации. Для того чтобы получить более точное значение сдвига ВКФ в зоне воздействия, мы использовали окно, размер которого был близок к длине зоны воздействия (7500 отсчетов – 20 см). В данном случае размер окна подобран таким образом, чтобы в него укладывался исследуемый фрагмент. Допустить то, что механические напряжения на исследуемом фрагменте равны, позволяет использование балки равного сопротивления. На рис. 8 точками показаны четыре различные зависимости сдвига корреляционной функции от приложенной силы (для первой вариации установки).

Рис. 8. Зависимость показаний установки (схема 1) от приложенной к измерительному участку световода деформации.

Сплошной линией изображен усредненный линейный тренд по этим четырем измерениям. Поскольку мы считаем первую вариацию установки "классической" (своего рода золотым сечением для распределенной волоконной сенсорики методом OFDR), данный усредненный тренд мы будем считать эталонным и будем сравнивать с ним отдельные измерения. Так, внутри самой этой выборки максимальное отклонение от тренда составляет 13 мкСтрейн (рис. 9).

Рис. 9. Отклонение от эталонного значения для первой вариации установки

После проведения данного эксперимента установка была переконфигурирована: газовая ячейка была подключена к каналу вспомогательного интерферометра, а ее собственный канал с фотодетектором был упразднен. На графике (рис. 10) точками представлены те же четыре измерения, полученные на второй вариации установки.

Рис. 10. Зависимость показаний установки (схема 2) от приложенной к измерительному участку световода деформации

Линией показан тренд, полученный на первой вариации установки, принимаемой за эталон, отклонения от этого тренда представлены на рис. 11. Максимальная погрешность составляет 18 мкСтрейн (5.1%), что немногим больше погрешности данных, полученных на первой вариации установки, – 13 мкСтрейн (3.8%). Стоит, однако, отметить, что обе погрешности не превышают 18 мкСтрейн удлинения оптоволоконного сенсора, они являются характерными погрешностями для экспериментов, в которых волоконный сенсор приклеивается к балке равного сопротивления именно такой конструкции [17, 18].

Рис. 11. Отклонение от эталонного значения для второй вариации установки

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен эксперимент по модификации конфигурации оптического частотного рефлектометра путем замены двух специальных сервисных каналов, включающих вспомогательный интерферометр и газовую ячейку, на один канал. Целью данного исследования была оценка возможности использования схемы с объединенным каналом для сенсорных применений. Мы показали, что погрешность измерений, полученных на модифицированной установке, незначительно отличается от характерного для данного эксперимента разброса данных, полученных на классической вариации оптического рефлектометра частотной области. Работа демонстрирует работоспособность модифицированной установки для сенсорных применений, она должна стать отправной точкой для проведения новых работ в данном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Karapanagiotis C., Schukar M., Breithaupt M. et al.* // eJNDT. 2024. V. 29. № 7. <https://doi.org/10.58286/29701>
2. *Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Koshelev K.I. et al.* // Sensors. 2021. V. 21. № 21. P. 7077. <https://doi.org/10.3390/s21217077>
3. *Hartog A.H., Liokumovich L.B., Ushakov N.A. et al.* // Geophys. Prospect. 2018. V. 66. № S1. P. 192. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12612>

4. *Ghazali M.F., Mohamad H., Nasir M.Y. et al.* // Opt. Fiber Technol. 2024. V. 87. P. 103911. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2024.103911>
5. *Konstantinov Y.A. Kryukov I.I., Pervadchuk V.P., Toroshin A.Yu.* // Quantum Electron. 2009. V. 39. № 11. P. 1068. <https://doi.org/10.1070/QE2009V039N11ABEH014171>
6. *Stepanov I K.V., Zhirnov A.A., Sazonkin S.G. et al.* // Sensors. 2022. V. 22. № 13. P. 4781. <https://doi.org/10.3390/s22134781>
7. *Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G., Fedorov A.* // Sensors. 2022. V. 23. № 1. P. 410. <https://doi.org/10.3390/s23010410>
8. *Кривошеев А.И., Барков Ф.Л., Константинов Ю.А., Белокрылов М.Е.* // ПТЭ. 2022. № 5. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S0032816222050275> [*Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Yu.A., Belokrylov M.E.* // Instrum. Exp. Tech. 2022. V. 65. № 5. P. 687. <https://doi.org/10.1134/S0020441222050268>]
9. *Matveenko V., Serovaev G., Kosheleva N., Gusev G.* // Procedia Struct. Integr. 2021. V. 33. P. 925–932. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.103>
10. *Rui Min, Yunfeng Chen, Hang Wang, Yangkang Chen.* // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2024. V. 62. P. 1. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3371052>
11. *Song Jiayi, Sui Weibo, He Jinbao et al.* Combining DAS and DTS Measurements for Oil-Water Two-Phase Flow Profiling in Sucker Rod Pump Wells. Paper presented at the ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, 2023. <https://doi.org/10.2118/216018-MS>
12. *Li D., Yi D., Zhou X., Chen X., Geng Y., Li X.* // IEEE Sens. J. 2024. V. 24. № 20. P. 32185. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3449440>
13. *Pierau R.-E., Katsifolis J., Meehan A., Rezatofighi, H., Stuckey, P.J.* // Opt. Express. 2025. V. 33, № 3. P. 4109. <https://doi.org/10.1364/OE.542663>
14. *Lobach I.A., Fotiadi A.A., Yatseev V.A. et al.* // Sensors. 2024. V. 24. № 16. P. 5432. <https://doi.org/10.3390/s24165432>
15. *Belokrylov M.E., Kambur D.A., Konstantinov Yu.A., Claude D., Barkov F.L.* // Sensors. 2024. V. 24. № 4. P. 1253. <https://doi.org/10.3390/s24041253>
16. Swept Photonics Analyzer (SPA-100) Santec. Электронн. данн. <https://inst.santec.com/products/componenttesting/spa-100>
17. *Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G.* // Procedia Struct. Integr. 2023. V. 50. P. 184. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.10.040>
18. *Matveenko V.P., Serovaev G.S., Galkina E.B., Koniukhov V.A.* // Procedia Struct. Integrity. 2025. V. 72. P. 229. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.08.097>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Первая вариация экспериментальной установки.
- Рис. 2.** Вторая вариация экспериментальной установки.
- Рис. 3.** Балка равного сопротивления.
- Рис. 4.** Пример АЧХ и ФЧХ рассматриваемого фильтра для частоты среза 5 МГц.
- Рис 5.** Схематичное изображение процесса выделения сигнала вспомогательного интерферометра с помощью фильтра высоких частот (ФВЧ).
- Рис.6.** Алгоритм обработки данных с двух установок (БПФ – быстрое преобразование Фурье, ВКФ – взаимнокорреляционная функция).
- Рис. 7.** Воздействие на сенсор (с пространственным усреднением по 4 отсчетам).
- Рис. 8.** Зависимость показаний установки (схема 1) от приложенной к измерительному участку световода деформации.
- Рис. 9.** Отклонение от эталонного значения для первой вариации установки.
- Рис. 10.** Зависимость показаний установки (схема 2) от приложенной к измерительному участку световода деформации.
- Рис. 11.** Отклонение от эталонного значения для второй вариации установки.

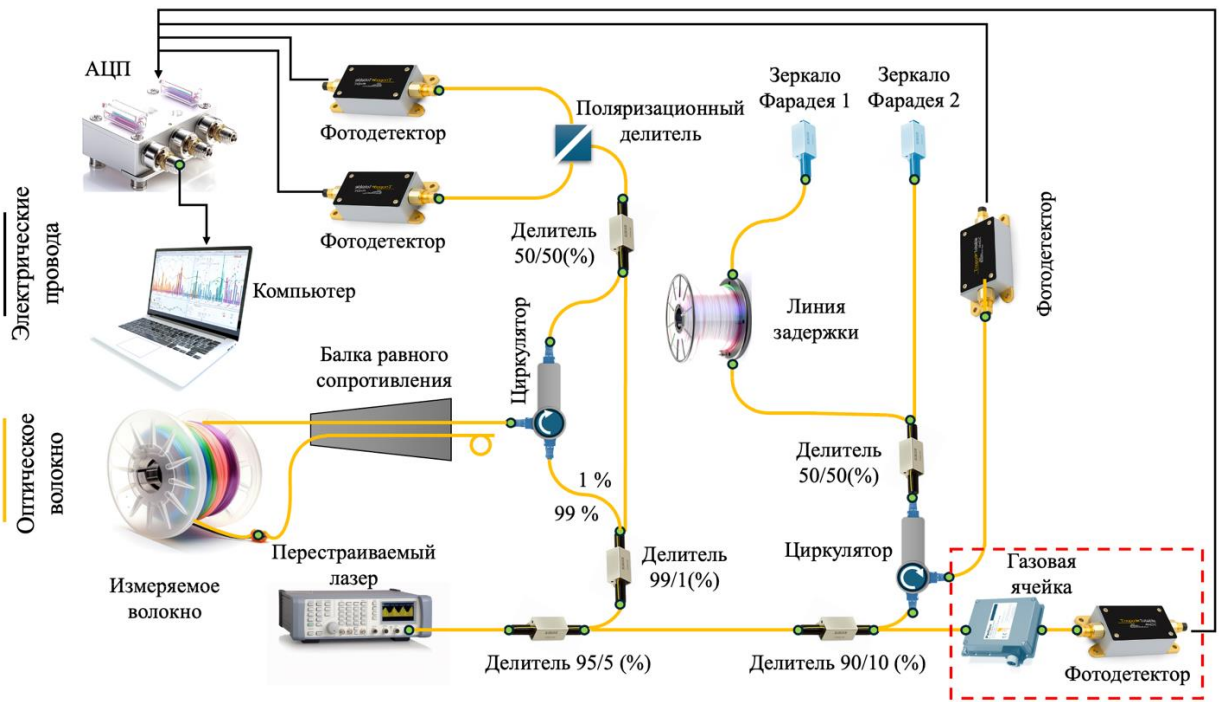


Рис. 1.

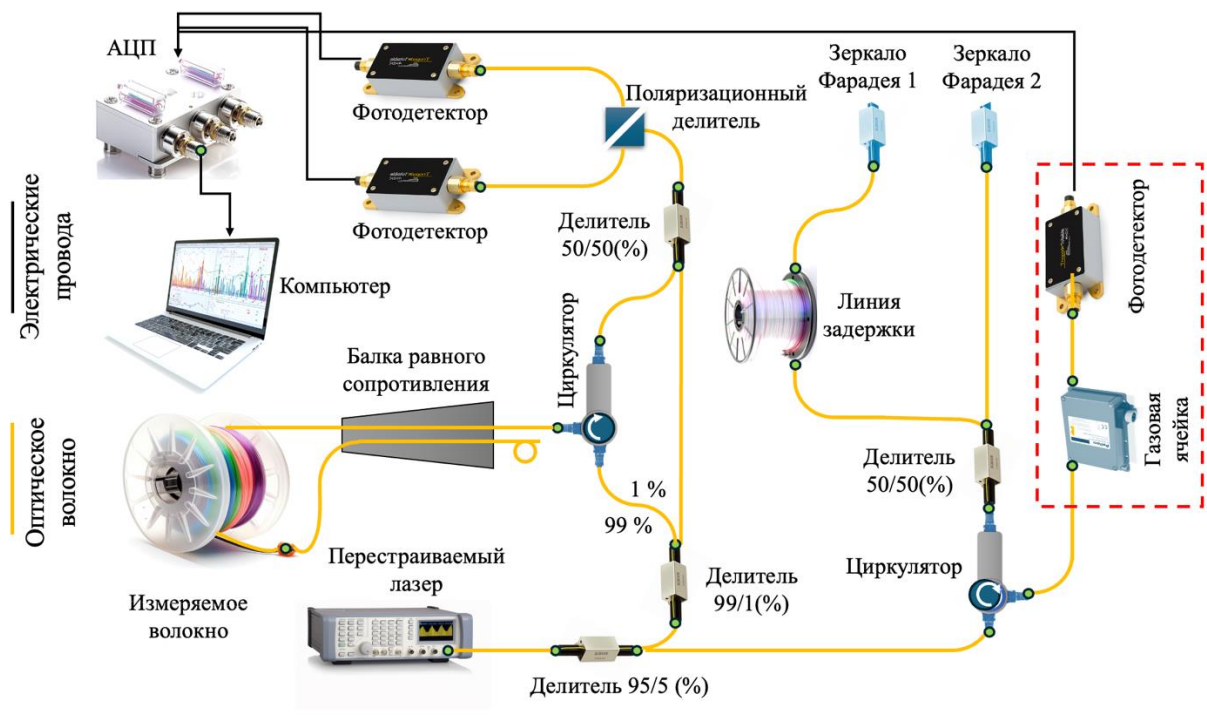


Рис. 2.

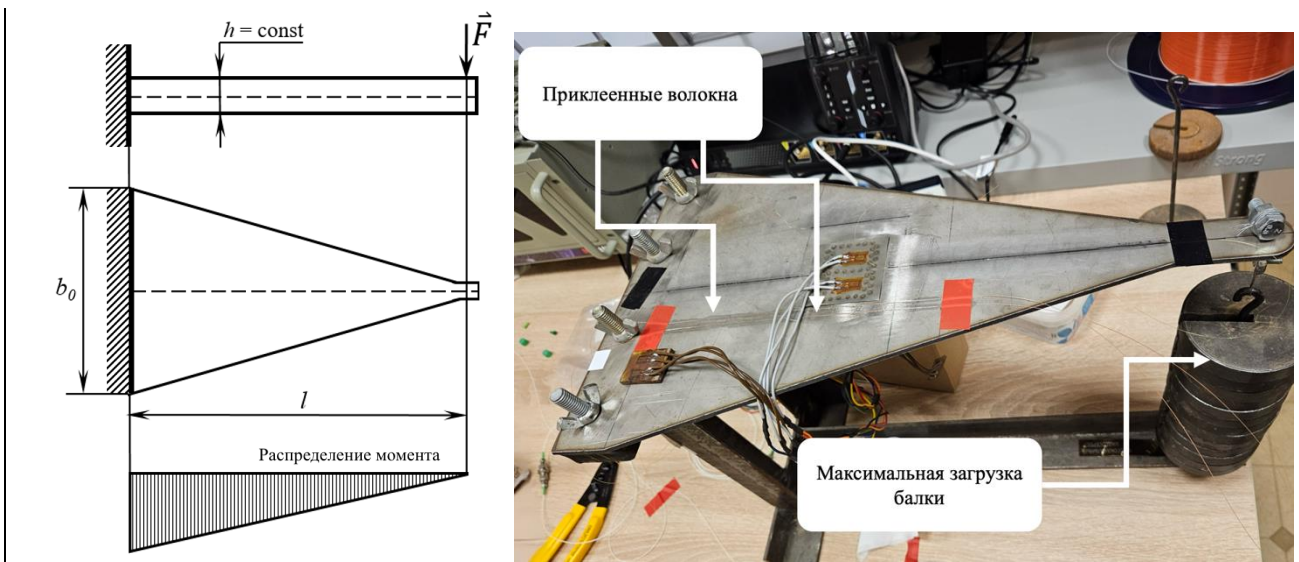


Рис. 3.

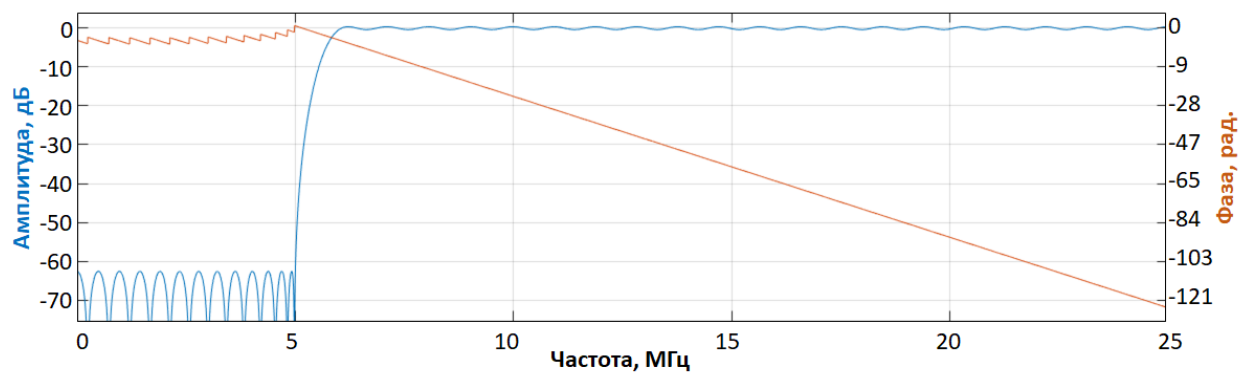


Рис. 4.

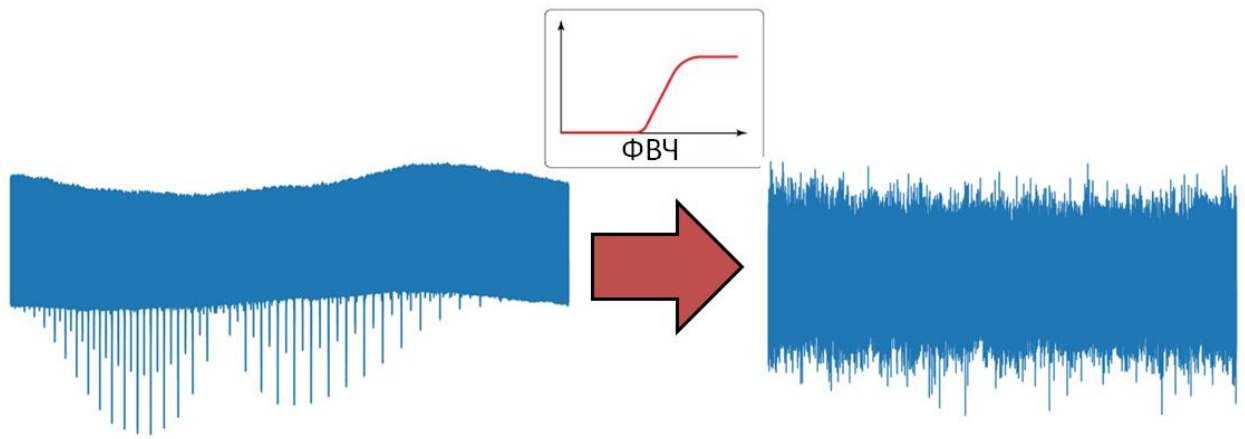


Рис 5.

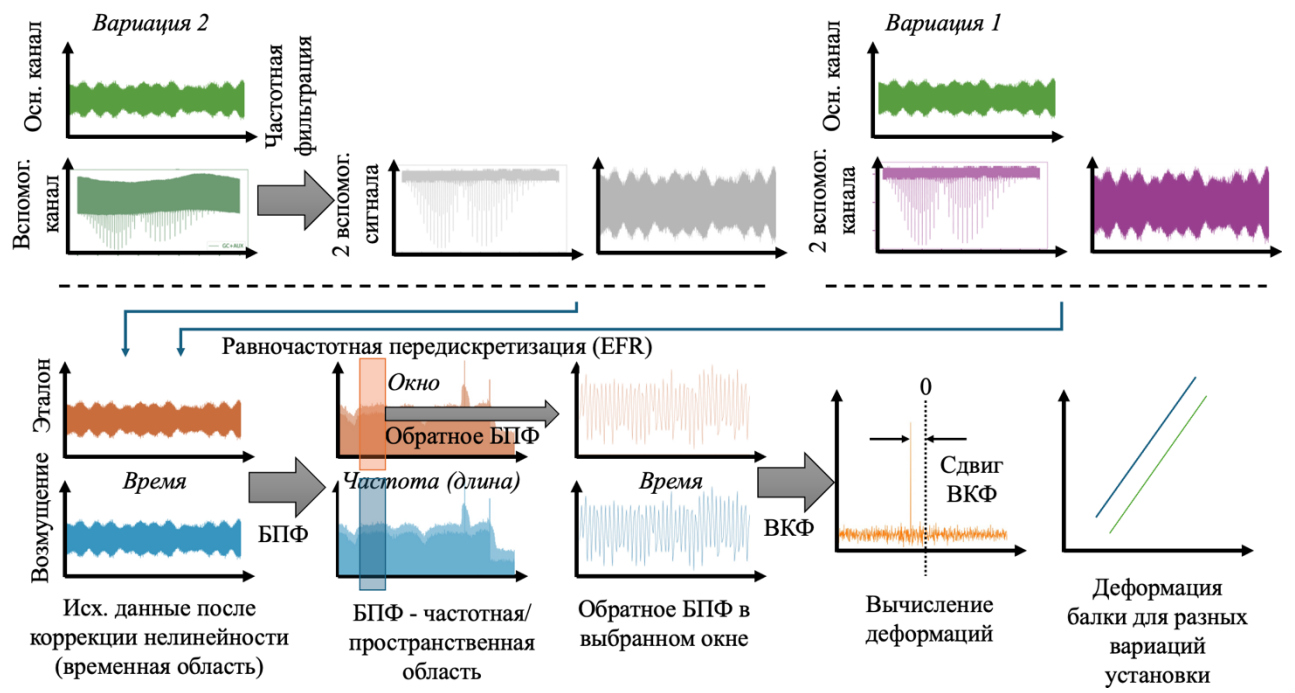


Рис.6.

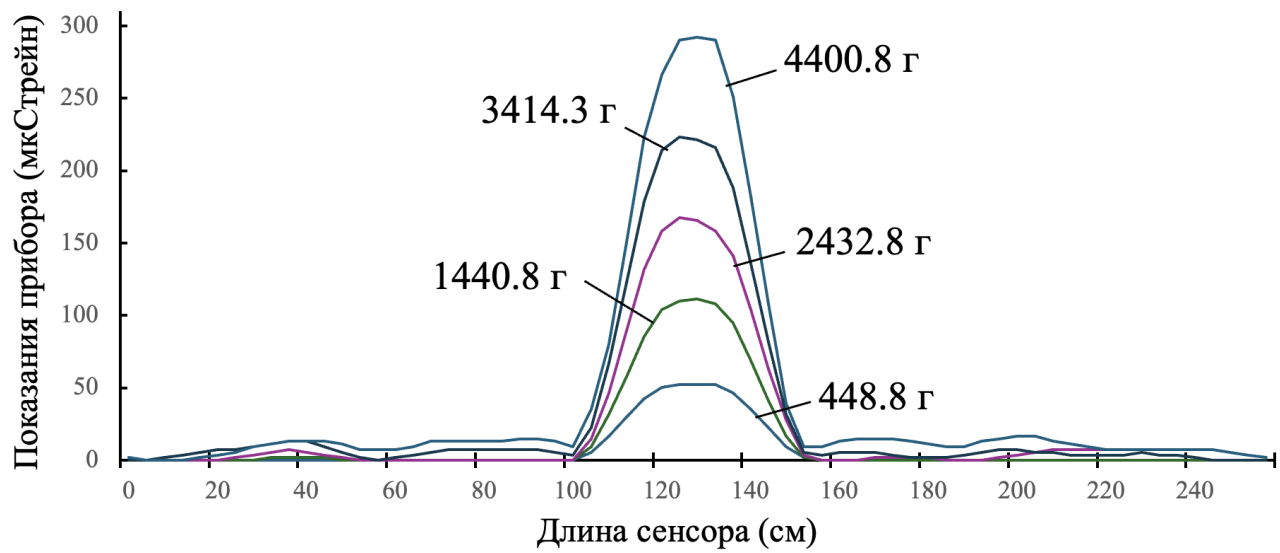


Рис. 7.

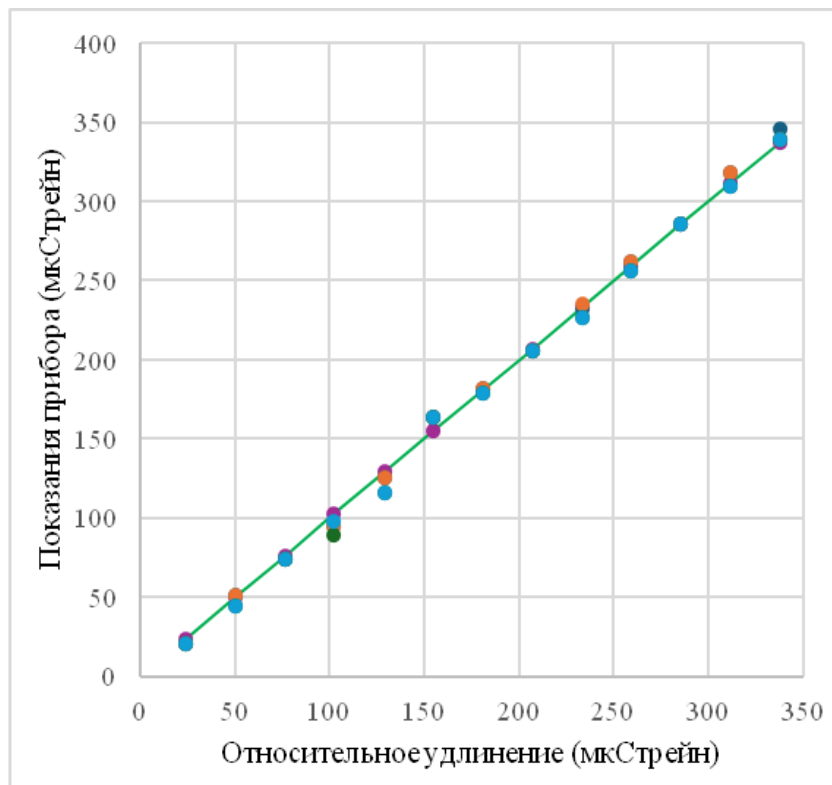


Рис. 8.

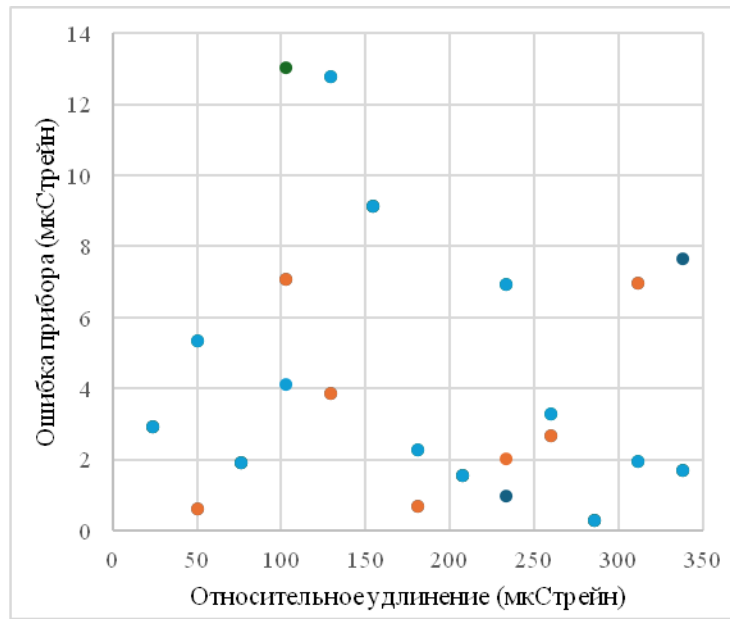


Рис. 9.

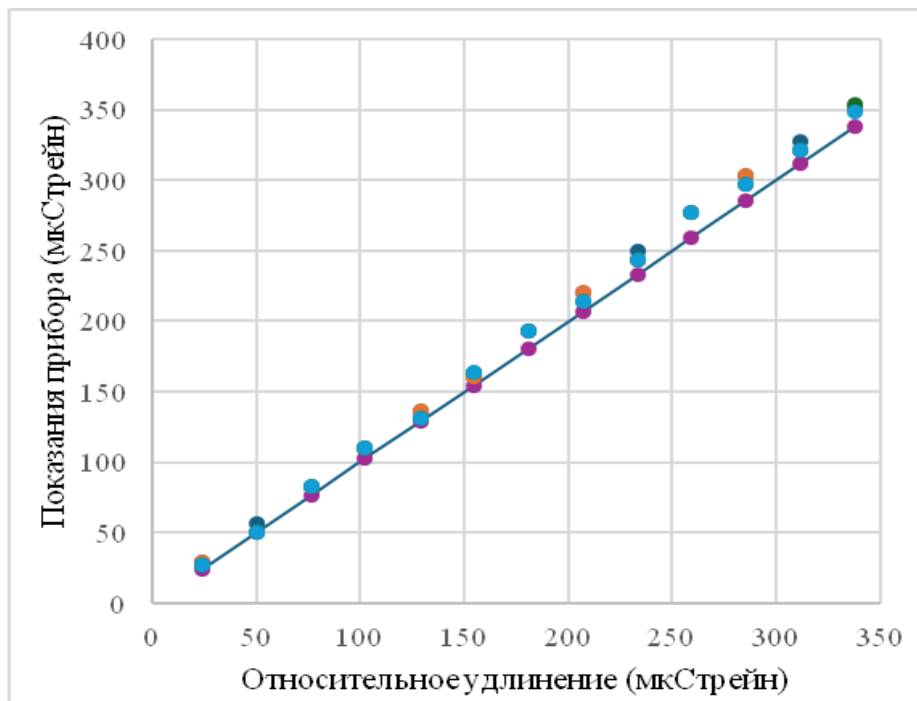


Рис. 10.

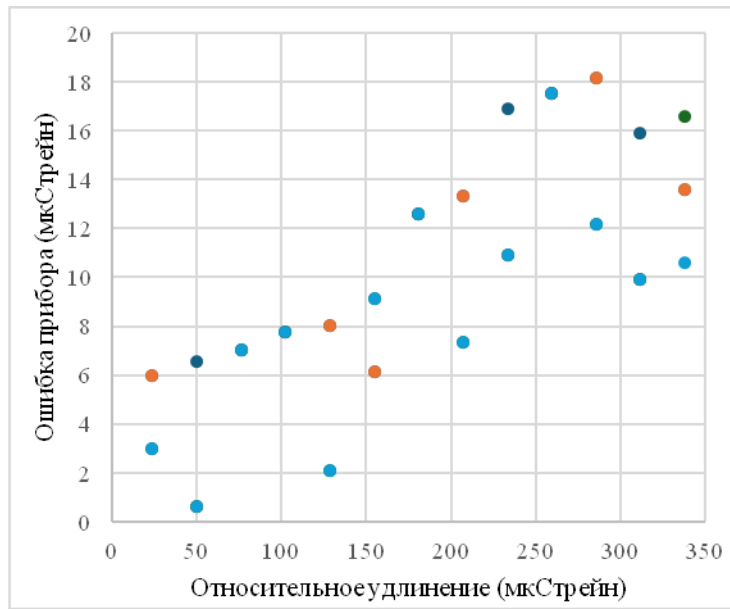


Рис. 11.