

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **Физический**

Кафедра **Автоматизации физико-технических исследований**

Направление подготовки **03.03.02 Физика**

Образовательная программа **Бакалавриат**

ВЫПУСКАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Котюшев Михаил Юрьевич

Тема работы: **Система сбора и анализа данных для датчика
изгибных деформаций на основе многосердцевидного волоконного
световода**

«**К защите допущена**»

Заведующий кафедрой,

к.т.н.

Лысаков К. Ф./.....

«.....».....2018 г.

Научный руководитель

м. н. с.,

ИАиЭ СО РАН

Вольф А. А./.....

«.....».....2018 г.

Дата защиты: «.....».....2018 г.

Новосибирск, 2018

Система сбора и анализа данных для датчика изгибных деформаций на основе многосердцевинного волоконного световода

Котюшев Михаил Юрьевич

Физический факультет. Кафедра автоматизации физико-технических исследований.

Группа №14305, 2018.

Научный руководитель:

А. А. Вольф, м. н. с. ИАиЭ СО РАН.

Аннотация

В ходе данной работы была разработана программно-аппаратная система для опроса и визуализации данных датчика изгибных деформаций на основе массива волоконных брэгговских решеток (ВБР) в многосердцевинном оптическом волокне. Были реализованы алгоритмы для поиска и отслеживания сдвигов резонансных пиков ВБР, получения данных об изгибах и восстановления формы волокна. Проведены эксперименты для подтверждения работоспособности полученной системы, включающие в себя протяжку одиночного датчика через двух- и трех- мерные трассы заранее заданной геометрии, восстановление формы трасс по показаниям датчика и сравнение восстановленной формы с эталоном.

Система была протестированна на одиночном датчике изгибных деформаций в схеме с протяжкой датчика через тефлоновую трубку, уложенную в трассу известной формы. Минимальный и максимальный радиус изгиба в эксперименте составил 7.5 мм и 20 мм соответственно. Результатом тестирования стала кривая отклонения восстанавливаемой формы трассы от эталонной в зависимости от расстояния вдоль трассы. Наибольшее отклонение от эталона составило 23.39 мм в двумерном случае и 8.44 мм в трехмерном случае.

Содержание

Введение	4
1 Обзор предметной области и теория	7
1.1 Волоконные брэгговские решетки и датчики на их основе	7
1.1.1 Оптические волноводы	7
1.1.2 Теория волоконных брэгговских решеток	9
1.1.3 Применение волоконных брэгговских решеток в качестве датчиков физических величин	11
1.2 Датчик изгибов на массиве брэгговских решеток	12
1.2.1 Обзор литературы	12
1.2.2 Теория датчика изгибов	14
2 Схема опроса и обработка данных датчика изгибов	17
2.1 Схема опроса датчика	17
2.2 Этапы обработки данных	18
2.2.1 Получение спектров	18
2.2.2 Поиск пиков	19
2.2.3 Получение радиусов и направлений изгиба	20
2.2.4 Восстановление формы	21
2.3 Реализация обработки в программном обеспечении	22
2.4 Оценка погрешности системы	24
3 Верификация системы	26
3.1 Схема эксперимента	26
3.2 Восстановление формы плоской кривой	30
3.3 Восстановление формы кривой в трехмерном пространстве	36
Заключение	38

Введение

Оптические датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) являются одним из важнейших приложений волоконной оптики. Такие датчики обладают рядом уникальных свойств: малым размером, невосприимчивостью к электромагнитным полям, химической инертностью, устойчивостью к высокой температуре. При помощи оптических датчиков на основе ВБР может быть осуществлен мониторинг таких параметров как температура, растяжение, изгиб, кручение, показатель преломления окружающей среды. Это позволяет находить им применение в таких областях как нефтедобыча, медицина, авиастроение, строительство.

В последние годы развитие технологии изготовления оптических волокон, а также технологии записи ВБР на их основе, сделали возможным создание оптических датчиков на основе многосердцевинных волоконных световодов. Основное преимущество многосердцевинного волокна заключается в возможности реализовать большее количество датчиков, нежели с использованием стандартного одномодового волокна, не увеличивая при этом размеров волокна. По сравнению с датчиками на стандартном волокне, область разработки датчиков на многосердцевинном волокне не является тщательно изученной, что позволяет улучшить существующие решения на базе ВБР в односердцевинных волокнах.

Для работы с датчиками на основе ВБР в многосердцевинном волокне используются специализированные системы опроса (интеррогаторы), которые включают в себя оптическую схему, позволяющую осуществлять передачу и регистрацию спектров ВБР-датчика, и электронный модуль, позволяющий производить обработку получаемой информации — цифровую обработку сигналов, извлечение полезных данных согласно теоретической модели датчика, пересчет показаний датчика согласно калибровочным характеристикам.

Целью данной работы является создание системы сбора и анализа данных для волоконно-оптического датчика изгибных деформаций на основе массива ВБР, записанного в многосердцевинном волокне.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Реализовать протокол взаимодействия ПК с интеррогатором для получения спектров сердцевин.
2. Выбрать и реализовать лучший по точности и времени работы алгоритм обнаружения пиков ВБР на получаемых с интеррогатора спектрах.
3. Реализовать алгоритм получения величины и направления изгиба по сдвигам пиков ВБР.
4. Разработать и реализовать алгоритм получения формы сенсора по изгибам волокна в нескольких точках;
5. Провести верификацию полученной системы путем сравнения восстановленной формы волокна и измеряемого эталона.

В ходе данной работы была разработана программно-аппаратная система для опроса и визуализации данных датчика изгибных деформаций на основе массива волоконных брэгговских решеток (ВБР) в многосердцевинном оптическом волокне. Были реализованы алгоритмы для поиска и отслеживания сдвигов резонансных пиков ВБР, получения данных об изгибах и восстановления формы волокна. Проведены эксперименты для подтверждения работоспособности полученной системы, включающие в себя протяжку одиночного датчика через двух- и трех- мерные трассы заранее заданной геометрии, восстановление формы трасс по показаниям датчика и сравнение восстановленной формы с эталоном.

Система была протестированна на одиночном датчике изгибных деформаций в схеме с протяжкой датчика через тефлоновую трубку, уложенную в трассу известной формы. Минимальный и максимальный радиус изгиба в эксперименте составил 7.5 мм и 20 мм соответственно.

Результатом тестирования стала кривая отклонения восстанавливаемой формы трассы от эталонной в зависимости от расстояния вдоль трассы. Наибольшее отклонение от эталона составило 23.39 мм в двумерном случае и 8.44 мм в трехмерном случае.

1 Обзор предметной области и теория

В данной главе приведено краткое введение в волоконную оптику, теорию волоконных брэгговских решеток и применения ВБР в качестве датчиков физических величин. Построена теория датчика изгибных деформаций на основе массива ВБР в многосердцевинном оптическом волокне и дан обзор литературы в области оптических датчиков изгиба.

1.1 Волоконные брэгговские решетки и датчики на их основе

1.1.1 Оптические волноводы

Оптическое волокно — цилиндрический диэлектрический волновод, состоящий из сердцевины радиуса a и оболочки радиуса b (рис. 1). Сердцевина имеет показатель преломления n_1 , немного превышающий показатель преломления оболочки n_2 . Лучи, попадающие в сердцевину волокна под углами к оси меньше критического $\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$, испытывают полное внутреннее отражение и движутся дальше по волноводу. Лучи, имеющие больший наклон, при отражении теряют часть мощности на прохождение в оболочку и в последствии быстро затухают. Ход лучей в оптическом световоде показан на рис. 1.

Сердцевина и оболочка оптического волокна часто изготавливаются из одного и того же материала, уменьшение или увеличение показателя преломления достигается путем легирования. Основным материалом для

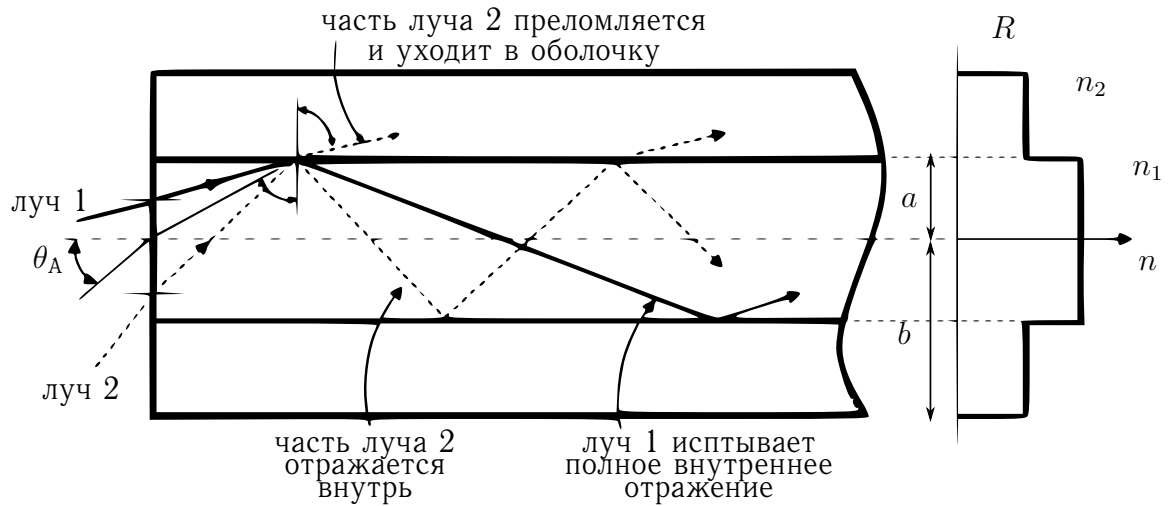


Рис. 1: Устройство оптического волокна и ход лучей в волокне.

изготовления является кварцевое стекло (SiO_2), легирующие материалы — германий, бор и др. [1].

Типичные величины n_1 лежат в пределах от 1.44 до 1.46, разница показателей преломления сердцевины и оболочки оптического волокна $n_1 - n_2 \sim 10^{-2} - 10^{-4}$. Стандартное телекоммуникационное волокно SMF-28 имеет диаметр оболочки $2b = 125$ мкм и диаметр сердцевины $2a = 8.2$ мкм.

В зависимости от параметров, оптические волокна делятся на одномодовые (типичный диаметр сердцевины $2a = 4 - 10$ мкм) — в них может существовать только одна поперечная мода волны, многомодовые (диаметр сердцевины $2a > 20$ мкм) — в них может существовать одновременно несколько мод. Также существуют многосердцевинные оптические волокна, позволяющие передавать сразу несколько оптических сигналов по одному волноводу через различные, как правило, одномодовые, сердцевинны.

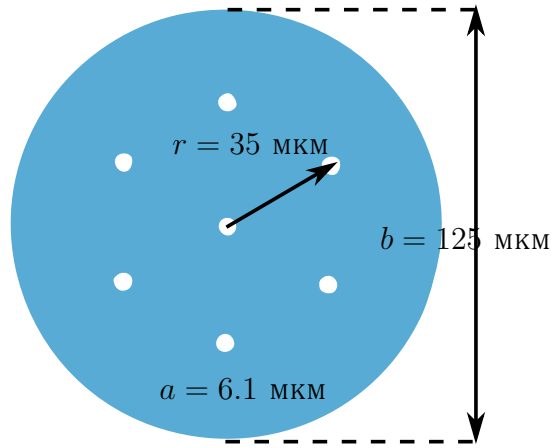


Рис. 2: Геометрия семисердцевинного оптического волокна симметричной гексагональной конфигурации Fibercore SM-7C1500(6.1/125).

1.1.2 Теория волоконных брэгговских решеток

Волоконная брэгговская решетка — периодическая модуляция показателя преломления, сформированная в сердцевине оптического волокна (рис. 3). За счет выполнения условия фазового синхронизма на такой структуре возникает связь между поперечными модами, распространяющимися в прямом и обратном направлении. Другими словами, на определенной резонансной длине волны структура ВБР отражает оптический сигнал, при этом ширина резонанса составляет ~ 100 пм для ВБР длиной ~ 1 мм.

Условие Брэгга позволяет из параметров ВБР определить резонансную длину волны спектра отражения [2]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

где n_{eff} — эффективный показатель преломления моды волокна (отношение фазовой скорости моды в волокне к скорости света в вакууме), Λ — период ВБР.

Коэффициент отражения $R(\lambda)$ в приближении для однородной решетки длины L с гармонической модуляцией показателя преломления

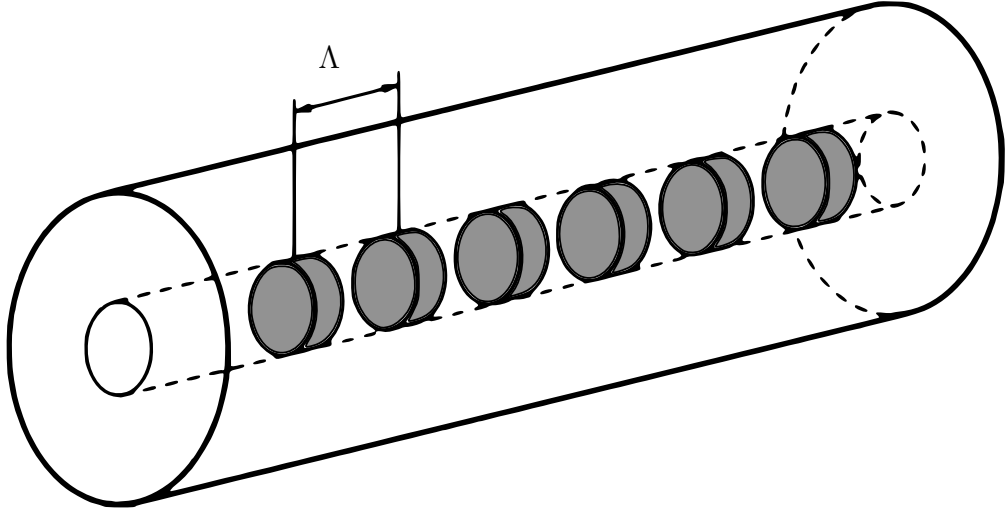


Рис. 3: Распределение показателя преломления по длине ВБР. Более темный цвет соответствует более высокому показателю преломления.

задается следующей формулой:

$$R(L, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(SL)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)}$$

где $\Omega = \pi \Delta n_{\text{mod}} \eta_B / \lambda_B$ – коэффициент связи, Δn_{mod} – амплитуда модуляции показателя преломления в первом порядке разложения формы штриха в ряд Фурье, η_B – доля мощности волны, распространяющаяся по сердцевине волокна радиуса (в большинстве случаев $\eta_B = 1$), $S = \sqrt{\Omega^2 + \Delta\beta^2}$, $\Delta\beta = \beta - \pi/\Lambda$ – отстройка волнового числа, $\beta = 2\pi n_0/\lambda$ – постоянная распространения.

График этой зависимости для решетки с параметрами $n = 1.4486$, $\Delta n = 1.5 \times 10^{-4}$, $\Lambda = 535$ нм, $L = 3$ мм представлен на рис. 4.

При $\lambda = \lambda_B$ – максимум резонанса ВБР ($\Delta\beta = 0$) – амплитуда максимума зависит от параметров решетки следующим образом:

$$R(L, \lambda_B) = \tanh^2(\Omega L)$$

Величина сдвига резонансной длины волны относительно начальных условий при температурных и механических воздействиях описывается следующей формулой:

$$\Delta\lambda_B = K_{\text{раст}}(\epsilon)\epsilon + K_{\text{тем}}(\Delta T)\Delta T \quad (1)$$

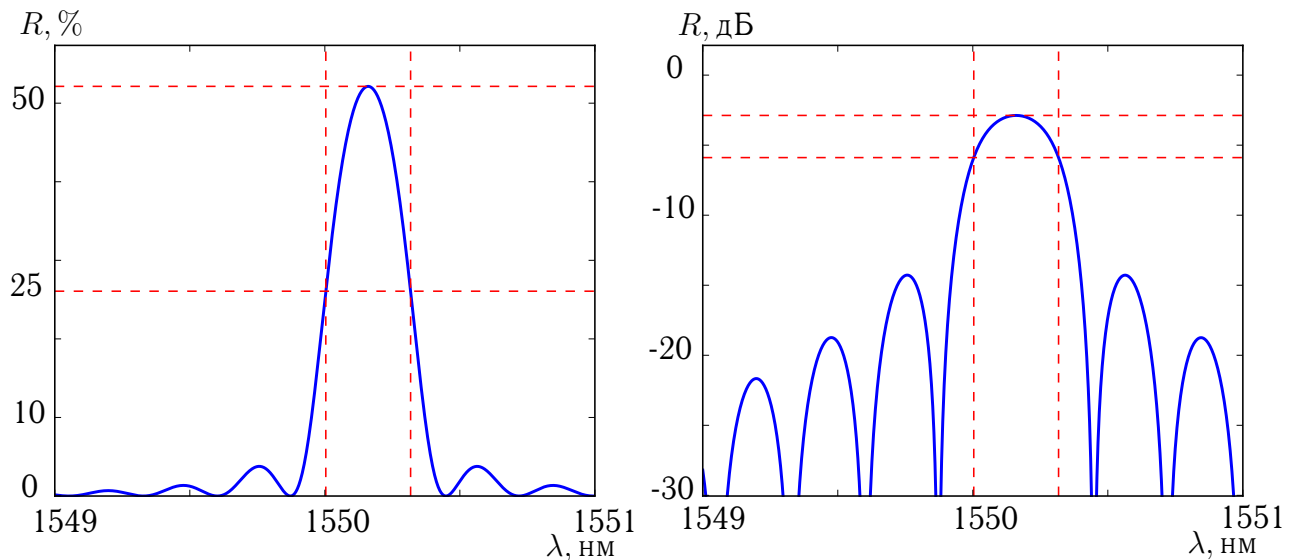


Рис. 4: Зависимость коэффициента отражения ВБР от длины волны вблизи резонанса в линейном (слева) и логарифмическом (справа) масштабе. $R_{\max} = 52.14\%$ (-2.83 дБ), $\lambda_c = 1550.163$ нм.

где $\epsilon = \Delta L/L$ – относительное растяжение ВБР по сравнению с начальными данными, ΔT – изменение температуры по сравнению с начальными данными, $K_{\text{раст}}(\epsilon)$ и $K_{\text{тем}}(\Delta T)$ – соответствующие коэффициенты чувствительности.

1.1.3 Применение волоконных брэгговских решеток в качестве датчиков физических величин

Одно из основных применений волоконных решеток заключается в использовании их в качестве сенсоров: при помощи датчиков на ВБР можно измерять такие параметры, как температура, растяжение, изгиб и скручивание волокна. Также существуют реализации датчиков показателя преломления жидкой среды [3], датчиков акустических ультразвуковых колебаний [4], вибрации [5], давления [6] и т. д.

Рассматриваемые в данной работе многосердцевинные оптические волокна позволяют реализовать датчики изгиба [7, 8, 9, 10, 11] и открыва-

ют возможность создания большего количества датчиков в малом объеме волокна.

По сравнению с датчиками на основе электрических схем, ВБР имеют ряд существенных преимуществ, таких как нечувствительность волокна и ВБР к электромагнитному излучению, стойкость к радиации, высокой температуре и давлению и т. д. [12]. Так как оптическое волокно позволяет передавать сигнал на большие расстояния, устройства для сбора спектров ВБР размещаются вне неблагоприятной среды и не подвергаются нежелательным воздействиям.

1.2 Датчик изгибов на массиве брэгговских решеток

1.2.1 Обзор литературы

За последние несколько лет было предпринято несколько попыток построения датчика изгибов на оптическом волокне записанными в нём ВБР.

В работе Флокарта и др. [7] рассматривается массив из трех ВБР, расположенных в одном сечении симметричного четырехсердцевинного телеком-волокна (France Telecom, $2a = 125 \pm 1$ мкм, расстояние между сердцевинами $d = 44$ мкм). Построена теоретическая модель, восстанавливающая кривизну в одном направлении по сдвигам пиков пары ВБР в одном срезе волокна. Образец с ВБР был помещен в зафиксированный с одного конца стальной капилляр, второй конец которого отклонялся в плоскости ХУ. Среднеквадратическое отклонение между измеряемой и действительной кривизной составило 0.0579 м^{-1} по оси Х и 0.0284 м^{-1} по оси У. Восстановление формы датчика не проводилось.

В работе Мура и др. [8] приведен распределенный датчик формы на трехсердцевинном оптическом волокне. Построенна теоретическая модель без термокомпенсации, позволяющая получить кривизну и направление изгиба по показаниям трех и более ВБР в одном срезе волокна. В трехсердцевинном оптическом волокне через каждые 10 мм вдоль волокна записаны датчики изгиба. Для восстановления формы волокна используется приближение линейного стержня Кирхгофа и формулы Френе-Серре. Распределенный датчик укладывался в каналы заданной формы, изготовленные при помощи ЧПУ-станка. Форма каналов сравнивалась с показаниями датчика. Максимальное отклонение в эксперименте с плоской кривой составило 8.07 мм на расстоянии 0.48 м вдоль кривой, в эксперименте с трехмерной кривой 31.06 мм на расстоянии 0.43 м вдоль кривой.

В работе Ли и др. [10] рассматривается температурно-скомпенсированный датчик изгибов на девяти ВБР в бессердцевинном волокне с записанными волноводами. Полученная ошибка измерения кривизны составляет $\pm 1.1 \times 10^{-3}$ мм, измерения угла изгиба $\pm 2.5^\circ$ для значений радиуса кривизны, равного 40 мм. Восстановление формы производилось путем интерполяции радиусов кривизны кубическим сплайном.

Основные недостатки подходов, описанных в этих работах:

1. Возникающие потери при использовании записанных фемтосекундным лазером волноводов ограничивают максимальное количество ВБР, которые могут быть записаны в волокно и использованы в датчике.
2. При УФ-записи ВБР невозможно записать в одном срезе волокна решетки с различными резонансными длинами волн. Это ограничивает возможность мультиплексирования датчиков по длинам волн и, как следствие, максимальное число датчиков в одном волокне.

1.2.2 Теория датчика изгибов

Рассмотрим волоконный световод, имеющий вместо одной сердцевинны две, расположенных на удалении $r_1 = r_2 = r$ от центра под углом $\phi_{12} = \phi_{21}$. Разместим в каждой из этих сердцевины по ВБР так, чтобы они находились в одном поперечном сечении волокна (рис. 5).

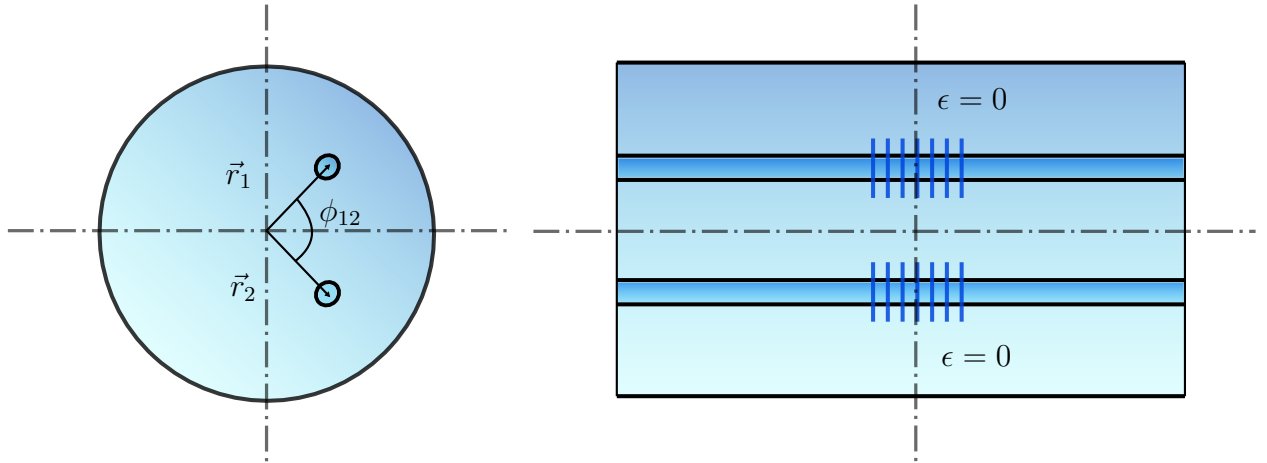


Рис. 5: Срез и вид сбоку датчика изгибов на двух ВБР в состоянии покоя.

Каждая из ВБР, в соответствии с формулой 1, выступает в роли датчика растяжения: снимая спектр отражения и отслеживая смещение пика $\Delta\lambda_i$, где i – номер сердцевинны, можно получить относительное растяжение сердцевины ϵ_i :

$$\epsilon_i = \frac{1}{K_{\text{раст}}^i} \Delta\lambda_i \quad (2)$$

Изогнув рассматриваемое волокно под радиусом изгиба R_c в плоскости, отстоящей от начальной плоскости Π_0 на угол ϕ_c , получим картину, изображенную на рис. 6. Проанализировав спектры сердцевины и получив по формуле 2 относительные растяжения ϵ_1 и ϵ_2 , найдем значения ϕ_c и R_c .

Ниже приведен вывод формул направления и радиуса изгиба.

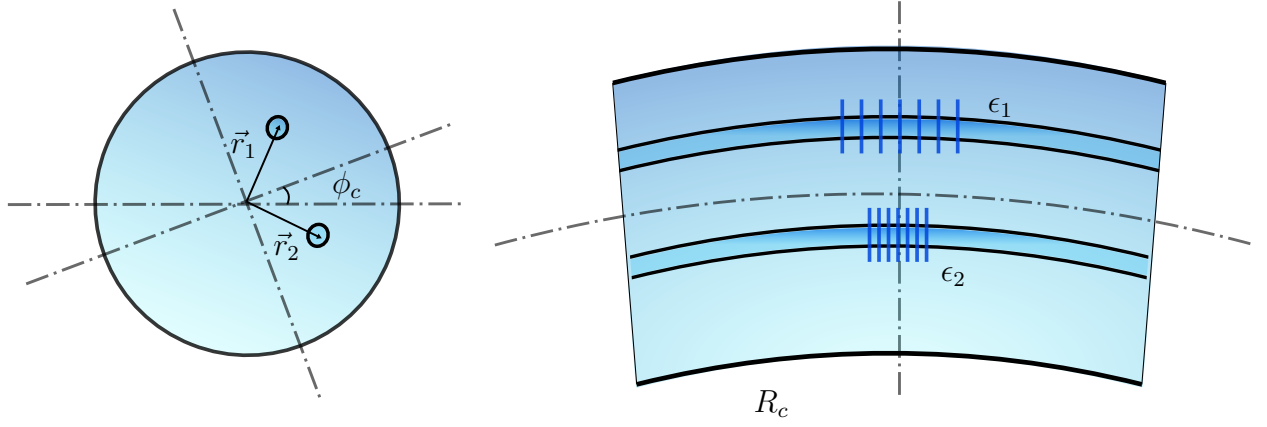


Рис. 6: Датчик изгиба при изгибе под радиусом R_c в направлении ϕ_c .

Направление изгиба

Введем $\vec{\alpha}_i$ — вектор относительного удлинения i -ой решетки:

$$\vec{\alpha}_i = \frac{\epsilon_i}{r_i} \frac{\vec{r}_i}{r_i} = \frac{\Delta\lambda_i}{K_{\text{раст}}^i r_i^2} \vec{r}_i$$

В случае растяжения i -ой решетки, $\vec{\alpha}_i$ направлен от по радиус-вектору ВБР, в случае сжатия – против. Просуммировав все $\vec{\alpha}_i$, получим вектор в направлении изгиба ϕ_c :

$$\vec{\alpha} = \sum_{i=1}^2 \vec{\alpha}_i = \sum_{i=1}^2 \frac{\Delta\lambda_i}{K_{\text{раст}}^i r_i^2} \vec{r}_i$$

Найдем ϕ_c как угол между вектором первой решетки и полученным вектором α :

$$\phi_c = \arccos \left(\frac{\vec{r}_1 \cdot \vec{\alpha}}{|\vec{r}_1| |\vec{\alpha}|} \right) + \frac{\pi}{2} + \phi_1 \quad (3)$$

Радиус изгиба

Для нахождения R_c выпишем относительное удлинение i -ой ВБР ϵ_i через отношение l'_i/l_i , где l_i — длина окружности, лежащей на нейтральной оси изгиба, l'_i — длина окружности, проходящей через i -ую ВБР:

$$\epsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_i} = \frac{l'_i}{l_i} - 1 = \frac{2\pi (R_i + r_i \sin(\phi_i + \phi_c))}{2\pi R_i} - 1 = \frac{r_i \sin(\phi_i + \phi_c)}{R_i}$$

Выразим R_i , подставив найденный на предыдущем шаге ϕ_c :

$$R_i = \frac{r_i \sin(\phi_i + \phi_c)}{\epsilon_i}$$

Для нахождения итогового R_c усредним показания всех решеток:

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^2 R_i}{2} \quad (4)$$

Полученный результат легко обобщить на случай N решеток, расположенных на различных удалениях r_i от центра волокна под различными углами ϕ_i . Таким образом, зная геометрическое расположение ВБР в сечении волокна и снимая данные о сдвиге их резонансных пиков, по формулам 3 и 4 можно вычислить изгиб волокна в данной точке.

Температурная компенсация

В соответствии с соотношением, данным формулой 1, пики ВБР будут смещаться не только при изгибе датчика, но и при изменении температуры и продольном растяжении, давая в построенной по формулам 3 и 4 модели ложные результаты. Скомпенсировать этот эффект в первом приближении можно, записав ВБР в центральную сердцевину волокна. Такая ВБР не будет подвержена растяжениям вследствие изгибов и может служить датчиком растяжения или температуры. Таким образом, получив сдвиг спектра центральной ВБР и используя в построенной ранее модели вместо $\Delta\lambda_i$ скомпенсированные значения $\Delta\lambda'_i = \Delta\lambda_i - \Delta\lambda_T$, можно получить температурно-скомпенсированный датчик изгибов.

2 Схема опроса и обработка данных датчика изгибов

В этой главе описана реализация теоретической модели датчика изгибов на ВБР, приведенной в параграфе 1.2. Описаны основные этапы обработки данных, приведена схема экспериментальной установки и структура программной части системы.

2.1 Схема опроса датчика

Опрос сердцевин происходил при помощи схемы, показанной на рис. 7. Семисердцевинное волокно Fibercore SM-7C1500 ($a = 6.1$ мкм, $b = 125$ мкм, $r_i = 35$ мкм) с датчиком изгиба подключается к разветвителю Fibercore FAN-7C, выводящему каждую сердцевину в отдельное односердцевинное волокно SMF-28. Затем каждое из односердцевинных волокон подключается к соответствующему входу интеррогатора НВМ FS22 (диапазон длин волн 1500 – 1600 нм, разрешение 1 пм, частота опроса в непрерывном режиме 1 Гц), который засвечивает сердцевины и снимает спектры отражения. Полученные спектры отправляются с интеррогатора на ПК через интерфейс Ethernet. На ПК из спектров извлекаются данные об изгибе датчика и восстанавливается форма волокна.

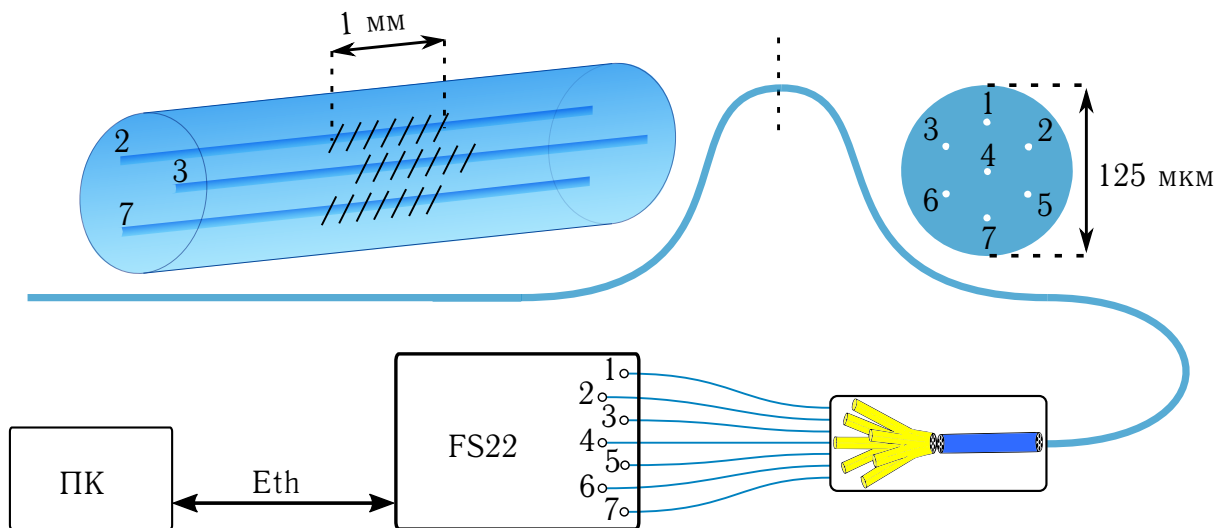


Рис. 7: Схема эксперимента по протяжке датчика изгибов.

2.2 Этапы обработки данных

Для извлечения информации о форме датчика изгиба получаемые при помощи описанной схемы спектры сердцевин с ВБР необходимо провести через несколько этапов обработки, каждый из которых подробно описан в этом параграфе.

2.2.1 Получение спектров

Первый этап обработки данных датчика — получение спектров с интеррогатора НВМ FS22. Для управления интеррогатором был реализован стандартный для научных измерительных приборов протокол SCIP (англ. Standard Commands for Programmable Instruments), функционирующий поверх TCP.

Для отправки одной команды и получения ответа необходимо выполнить следующую последовательность действий:

1. Открыть TCP-соединение с командным портом интеррогатора НВМ FS22.
2. Послать управляющую команду.
3. Получить ответ на команду (код исполнения команды либо запрашиваемые данные).
4. Закрыть TCP-соединение.

Основные реализованные команды с описанием приведены ниже.

:STATus?

Опрашивает статусное состояние интеррогатора НВМ FS22. Возвращает: 0 – ошибка, 1 – готов, 2 – свободный опрос, 3 – постоянный опрос, 4 – опрос по расписанию, 5 – прогрев.

:ACQUisition:OSATrace:CHANnel:C?

Получает оптический спектр канала C (цифра из диапазона 0-7 либо A для всех каналов) в полном диапазоне интеррогатора НВМ FS22 с шагом 5 пм. Возвращает спектр в виде CSV-строки.

2.2.2 Поиск пиков

Второй этап обработки данных — поиск на спектрах резонансных значений длин волн λ_b , соответствующих записанным сердцевинам ВБР. Существует несколько алгоритмов, решающих эту задачу. Сравнительные характеристики различных алгоритмов поиска пика показаны в таблице 1 ([13]). Данные взяты при соотношении сигнал / шум, равном 30 дБ, под сложностью подразумевается количество операций в зависимости от числа точек в спектре.

В силу оптимального соотношения точности и времени исполнения, в данной работе было решено применить последовательно грубый алгоритм локальных максимумов и алгоритм с использованием аппроксима-

ции квадратичным полиномом.

Реализация алгоритма в виде псевдокода приведена ниже:

Алгоритм 1. Алгоритм поиска пика.

```

1: До тех пока  $i < N_{\text{ВБР}}$  выполнять
2:   newPeak =  $\max(\text{spectra})$ 
3:   rudePeaks.append(newPeak)
4:    $\text{removeLocal}(\text{spectra}, \text{index}(\text{newPeak}))$ 
5: Конец цикла
6: До тех пока  $i < N_{\text{ВБР}}$  выполнять
7:    $\text{polynom} = \text{interpolate}(\text{spectra}, \text{index}(\text{rudePeaks}[i]))$ 
8:   newPeak =  $\max(\text{polynom})$ 
9:   accuratePeaks.append(newPeak)
10: Конец цикла

```

2.2.3 Получение радиусов и направлений изгиба

Следующий этап обработки данных — получение направления ϕ_c и величины R_c изгиба по найденным на предыдущем этапе резонансным длинам волн ВБР λ_b . Для решения этой задачи была реализована теоретическая модель, описанная в параграфе 1.2.

Таблица 1: Сравнение точности алгоритмов поиска пиков.

Алгоритм	Точность, пм	Сложность
Локальные максимумы	~ 50	$\sim n^2$
Аппроксимация полиномом степени 2	3	$\sim n^2$
Аппроксимация гауссианой	20	$\sim n^2$
Центроид	7.5	$\sim n$
Корреляция	1	$\sim n^3$

2.2.4 Восстановление формы

Последний этап обработки данных — получение формы волокна в окрестности датчика изгиба по значениям радиусов кривизны и направлений изгибов. Для решения этой задачи используется алгоритм аппроксимации сегментами окружностей, проиллюстрированный для двумерного случая на рис. 8.

Пусть из данных датчиков известны значения радиусов R_i и направлений ϕ_i изгибов в N точках вдоль волокна, расположенных друг от друга на расстояниях l_i , $i \in [0, N]$. Тогда представим каждый из участков в окрестности i -го датчика в виде сегмента окружности длиной l_i с радиусом R_i , повернутого относительно предыдущего сегмента на угол ϕ_i .

Использование такого подхода создает ограничение на минимальный радиус изгиба, который возможно восстановить:

$$2\pi R_c \gg \Delta l$$

где Δl — расстояние между точками, в которых измеряется изгиб.

Алгоритм восстановления формы кривой представлен ниже в виде псевдокода.

Алгоритм 2. Алгоритм восстановления формы кривой по дискретным данным о кривизне вдоль кривой.

- 1: **До тех пока** $i < N_{\text{изгибов}}$ **выполнять**
 - 2: $\text{segment} = \text{circleSegment}(\text{beginPoint}, \text{centerDir}, \text{movingDir}, \text{rads}[i], \text{lengths}[i])$
 - 3: $\text{curve.append}(\text{segment})$
 - 4: $\text{centerDir} = \text{rotate}(\text{centerDir}, \text{movingDir}, \text{angles}[i])$
 - 5: **Конец цикла**
-

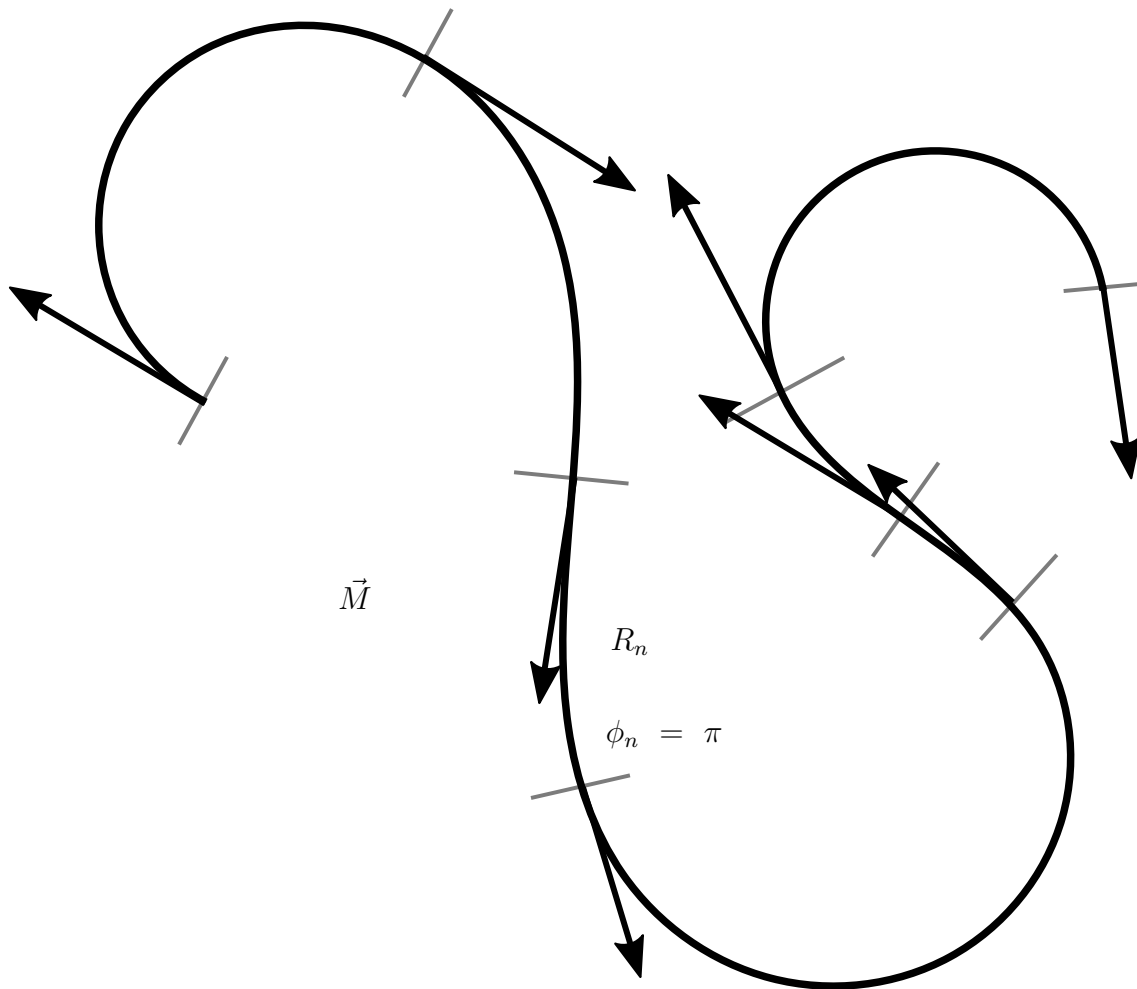


Рис. 8: Схематическое изображение работы алгоритма восстановления формы.

2.3 Реализация обработки в программном обеспечении

Программная часть системы, реализующая сбор и обработку данных, была написана на языке программирования Python 3.6 с использованием библиотек pyqt5 (Qt 5.9), NumPy и pyopengl (OpenGL). При помощи связки Python + NumPy производилась обработка данных, при помощи библиотеки Qt был реализован главный цикл программы, работа с аппаратными модулями, а также пользовательский интерфейс. Для проведения экспериментов по верификации системы также была разработана прошивка для микроконтроллера на языке Arduino C++.

Разработанное программное обеспечение имеет структуру, показанную на диаграмме классов на рис. 9.

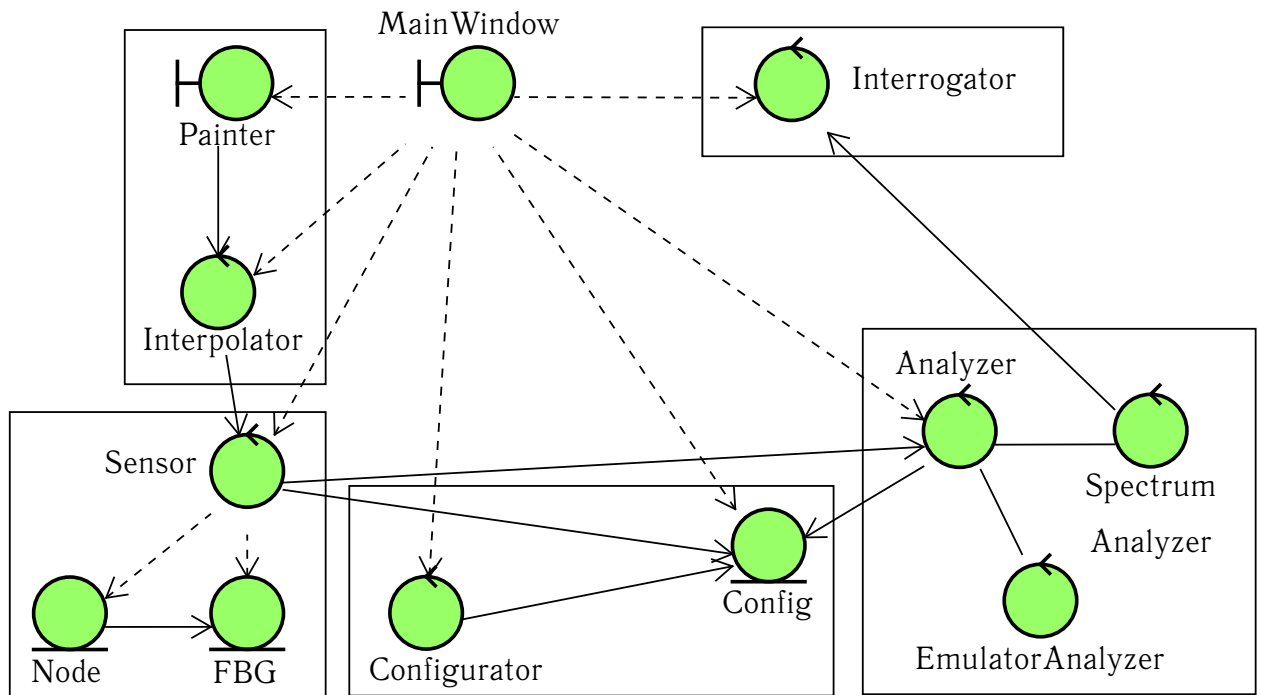


Рис. 9: Диаграмма классов программного обеспечения для работы с данными датчика изгибов.

Ниже приведено краткое описание роли каждого класса в работе системы.

- **MainWindow.** Создаёт и инициализирует экземпляры всех модулей и запускающий главный цикл событий приложения.
- **Interrogator.** Реализует протокол общения с интеррогатором НВМ FS22.
- **Analyzer. SpectrumAnalyzer. EmulatorAnalyzer.** Интерфейс и реализации класса Analyzer. Вычисляет пиковые длины волн решеток. SpectrumAnalyzer анализирует реальные спектры, EmulatorAnalyzer выдает заранее заданную конфигурацию длин волн (нужен для отладки системы без доступа к оборудованию).
- **Config.** Хранит конфигурацию датчика: геометрию расположения ВБР, оптические свойства ВБР (чувствительности и длины волн в покое).

- **Configurator.** Реализует пользовательский набор данных в экземпляре Config.
- **Sensor.** Реализует логику набора датчиков изгиба. Содержит несколько экземпляров Node, каждый из которых может измерять изгиб в определенной точке датчика.
- **Node.** Реализует логику одного датчика изгиба. Содержит несколько экземпляров FBG, данные об их геометрии и координату среза датчика вдоль волокна. Позволяет вычислить кривизну и направление изгиба в данной координате.
- **FBG.** Реализует логику ВБР: хранит текущую длину волны и параметры ВБР.
- **Interpolator.** Восстанавливает форму кривой по набору дискретных значений радиусов и направлений изгибов.
- **Painter.** Реализует отрисовку трехмерной кривой.

Обработка данных происходит по следующему сценарию: в начале **Interrogator** получает спектры и отправляет их в **SpectrumAnalyzer**, где из них извлекаются длины волн ВБР, которые записываются в **FBG** через набор **Node** в экземпляре **Sensor**. **Sensor**, в свою очередь, извлекает из этих данных значения радиусов и направлений изгибов. Затем **Interpolator** строит всю кривую по значениям изгибов в дискретных точках, после этого кривая отрисовывается и выводится на экран при помощи **Painter**.

2.4 Оценка погрешности системы

Каждый из этапов обработки данных накладывает ограничение на точность результата. Ниже представлены оценки возникающих ошибок для всех этапов, приведена суммарная оценка погрешности определения

длины волны резонанса ВБР, а также приведена зависимость ошибки определения радиуса кривизны δR_c от ошибки определения длины волны ВБР $\delta\lambda$ и радиуса R_c .

1. Спектральное разрешение интеррагатора НВМ FS22 составляет $\delta\lambda_{\text{инт}} = 1$ пм.
2. Оценка ошибки определения пика ВБР выбранным алгоритмом при $SNR = 30$ дБ составляет $\delta\lambda_{\text{алго}} \approx 3$ пм [13].
3. Кроме того, алгоритм не учитывает поляризационную чувствительность ВБР [14]. Данный эффект проявляется в виде деформации формы пика ВБР при изгибах и скручиваниях волокна. Это дает ошибку определения $\delta\lambda_{\text{поляр}} \approx 20$ пм.

Итоговая оценка точности определения резонансной длины волны ВБР составляет:

$$\delta\lambda_{\text{итог}} = \delta\lambda_{\text{инт}} + \delta\lambda_{\text{алго}} + \delta\lambda_{\text{поляр}} \approx 25 \text{ пм}$$

Построенная в параграфе 1.2 теоритическая модель датчика изгибов дает линейную зависимость ошибки определения радиуса изгиба от ошибки определения пиков ВБР, в то же время ошибка квадратично зависит от радиуса кривизны:

$$\delta R_c \sim R_c^2 \delta\lambda$$

Такая зависимость дает оценку ошибки определения радиуса кривизны на $R_c = 10$ см примерно $\delta R_c \approx 5$ мм, на $R_c = 1$ см примерно $\delta R_c \approx 0.05$ мм.

3 Верификация системы

В этой главе освещается ряд экспериментов по восстановлению формы волокна и сравнению получаемой формы с заранее определенным эталоном, направленных на подтверждение работоспособности полученной системы.

3.1 Схема эксперимента

Схема эксперимента представлена на рис. 10. Часть для опроса датчика использует схему из параграфа 2.1. В семисердцевинное оптическое волокно записан массив из четырех ВБР (длина ~ 2 мм), лежащих в одном сечении волокна. Три решетки записаны в периферийных сердцевинах, одна в центральной (начальные спектры ВБР представлены на рис. 11). Волокно подключается к портам интеррогатора НВМ FS22 посредством волоконного разветвителя. Интеррогатор подключается к ПК через интерфейс Ethernet и опрашивается с использованием протокола, описанного в параграфе 2.2.

Участок волокна с датчиком вправляется в тефлоновую трубку, уложенную в распечатанную на 3D-принтере трассу (тип пластика PLA, высота слоя 0.2 мм, диаметр сопла 0.2 мм) с заранее известной формой, заданной параметрической кривой. Волокно зажимается в колесо шагового двигателя (1600 шагов на оборот, диаметр колеса 20 мм) с энкодером ЛИР-119А, подключенного через контроллер SM5D-1.5 к микроконтроллеру Arduino Mega 2560. Микроконтроллер подключается к ПК через USB и принимает команды (список команд представлен в таблице 2) через виртуальный последовательный порт, а также отправляет

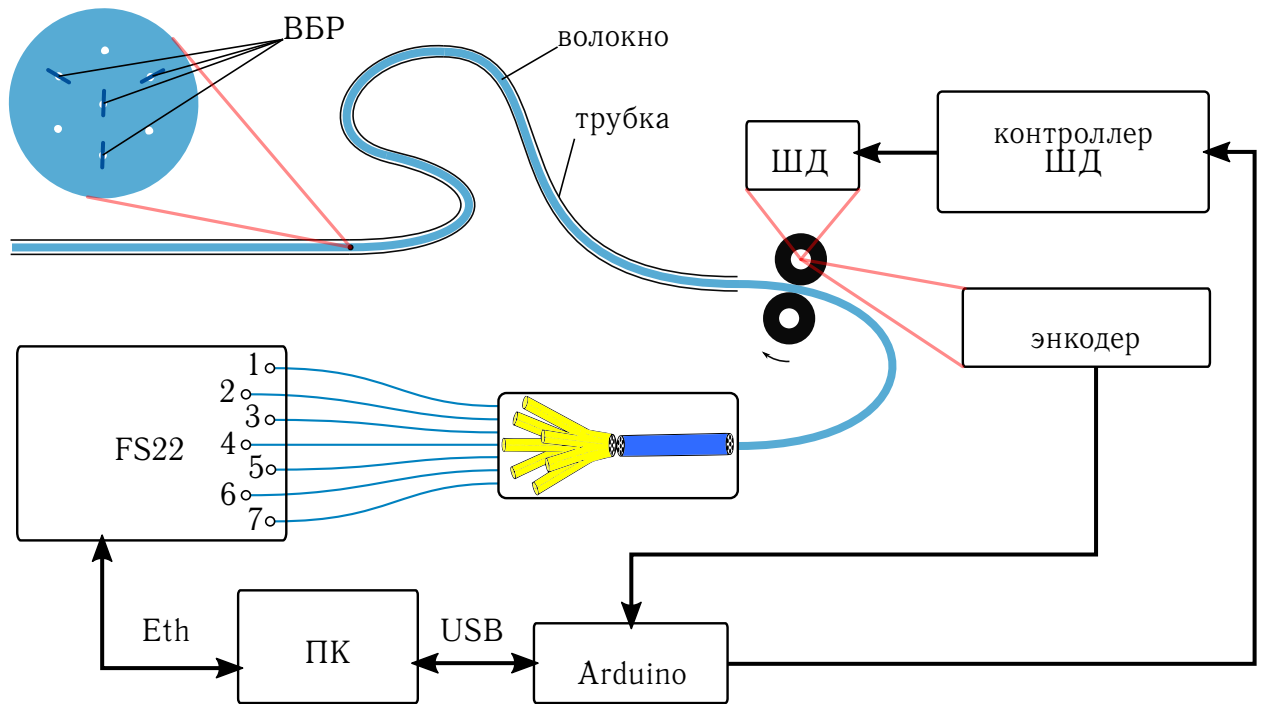


Рис. 10: Схема эксперимента по протяжке датчика изгибов.

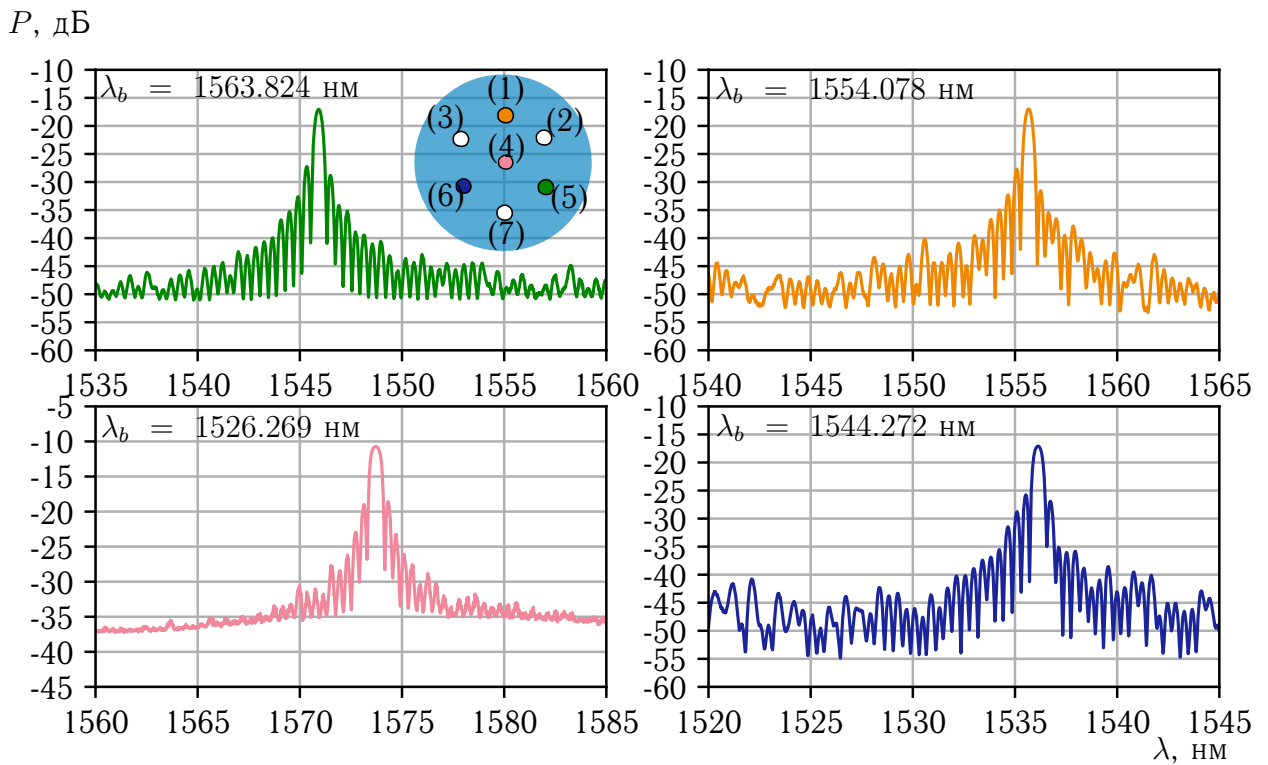


Рис. 11: Начальные спектры ВБР, использованных в эксперименте с протяжкой.

количество пройденных энкодером шагов.

При помощи шагового двигателя программа на ПК протягивает волокно с датчиком изгиба через трассу, останавливаясь через заданный интервал шагов для снятия спектров сердцевин и восстановления формы

пройденного участка трассы.

В следующих параграфах приведено описание предварительных шагов, сделанных перед постановкой основного эксперимента.

Калибровка энкодера

Для получения длины протянутого участка волокна из данных, приходящих с микроконтроллера, необходимо было измерить коэффициент перевода шагов в миллиметры:

$$[K_{\text{энк}}] = \left[\frac{\text{мм}}{\text{шаг}} \right]$$

Измерение $K_{\text{энк}}$ было произведено по следующей методологии: участок свободного волокна вручную протягивался с отключенным двигателем на заранее измеренное расстояние $L = 75$ см, число пройденных шагов записывалось, строилась выборка на 10 измерений. Среднее значение количества шагов равно 19339.2. Полученный коэффициент $K_{\text{энк}} \simeq 38.78$ мм/шаг.

Таблица 2: Команды микроконтроллера для управления протяжкой волокна.

Текст команды	Назначение
"stop"	Остановить движение двигателя
"start"	Начать движение двигателя
"cdir"	Сменить направление движения двигателя
"setv V "	Установить скорость движения на V шагов / сек
"mvto X "	Двигаться, пока не "текущее положение == X "
"mvon L "	Сдвинуться на L шагов
"poll"	Запросить число шагов, пройденных энкодером

Предварительные запуски и выявленные проблемы

Для тестирования экспериментальной схемы были проведены несколько тестовых запусков протяжки через уложенную случайным образом тefлоновую трубку. В ходе тестовых запусков были выявлены проблемы, описанные ниже.

Трение. В ходе пробных запусков протяжки на трассах различной длины было выявлено, что при длине трассы более 30 см или большом количестве изгибов малого радиуса, продольные компоненты возникающих сил трения не позволяют двигателю вытягивать волокно. Это дало ограничения на форму и сложность используемых в эксперименте трасс:

$$R_i > 1 \text{ см}$$

а также ограничения на длину трасс:

$$l_{\text{трассы}} < 30 \text{ см}$$

Скручивание. Также в результате обработки данных пробных экспериментов было обнаружено, что при сильном изменении угла изгиба ($\sim \pi$) волокно скручивается в трубке по мере протяжки вследствие возникающих на поверхности волокна сил трения. Это приводит к выдаче системой ложных показаний: скручивание датчика ошибочно принимается за изгиб. Так, при протяжке через трубку, уложенную в пробную трассу плоской конфигурации, восстановленная системой форма кривой выходила за рамки плоскости. Устранение этой проблемы требует привлечения более сложных способов уменьшения трения между волокном и трубкой, таких как использование смазки. Подобные меры повлекли бы за собой труднореализуемое усложнение экспериментальной установки, поэтому было решено не использовать их в ходе данной работы, упростив трассы в сторону менее резких скачков угла изгиба.

Выбор метрики совпадения

В качестве эталонной формы трассы служит параметрически заданная кривая, по которой строилась модель трассы. Метрикой совпадения выступает расстояние Δs между точками восстановленной кривой и эталона в зависимости от координаты вдоль трассы l :

$$\Delta s = \|\vec{r}_{\text{exp}}(l) - \vec{r}_{\text{theor}}(l)\| \quad (5)$$

Введенная метрика совпадения форм Δs сильно зависит от выбора начальной точки, относительной ориентации кривых $\vec{r}_{\text{восст}}(l)$ и $\vec{r}_{\text{эталон}}(l)$ и их относительного масштаба. Возникает задача выбора начальной точки и относительной ориентации двух сравниваемых кривых наилучшим образом. В данной работе использовано следующее решение этой задачи: из особенностей геометрии трассы (например, исходя из характерных резких поворотов в начале каждой трассы) определялась начальная точка. Взаимная ориентация кривых выбиралась таким образом, чтобы вектора касательных к кривым в начальной точке совпадали по направлению.

В следующих параграфах представлены результаты экспериментов для протяжки по трассам в двух- и трех- мерных случаях.

3.2 Восстановление формы плоской кривой

В двумерном случае были проведены эксперименты двух типов: в эксперименте первого типа использовалась трасса в виде плоской кривой без изменения направления изгиба, в эксперименте второго типа — трасса в виде плоской кривой с изменением направления изгиба на $\phi_c = \pi$.

Трасса без изменения направления изгиба

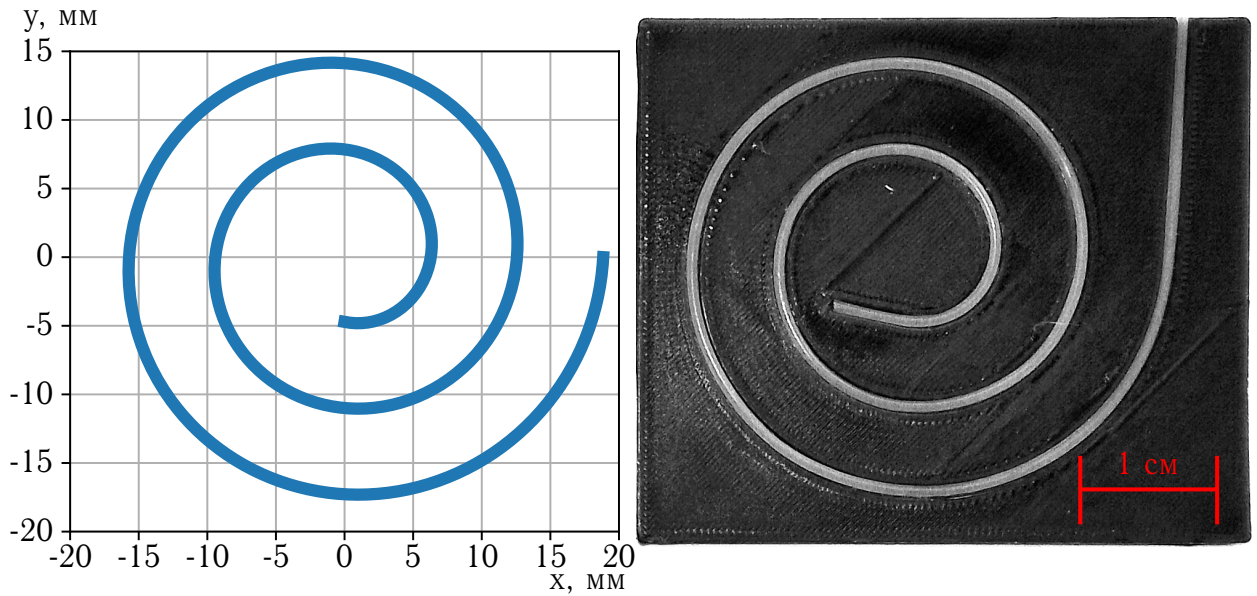


Рис. 12: График параметрически заданной кривой и распечатанная на 3D-принтере трасса.

Трасса для эксперимента первого типа представляет из себя двумерную спираль Архимеда, заданную следующим образом:

$$t \in \left[\frac{3\pi}{2}, 6\pi \right]$$

$$x = t \cos(t)$$

$$y = t \sin(t)$$

На рис. 12 приведен график кривой, а так же фотография распечатанной на 3D-принтере трассы с уложенной в неё тефлоновой трубкой.

Вид восстановленной кривой в эксперименте первого типа в сравнении с аналитической формой показан на рис. 13.

Метрика Δs в зависимости от координаты вдоль трассы l для этого эксперимента приведена на рис. 14. Максимальное отклонение в данном случае составило 5.24 мм.

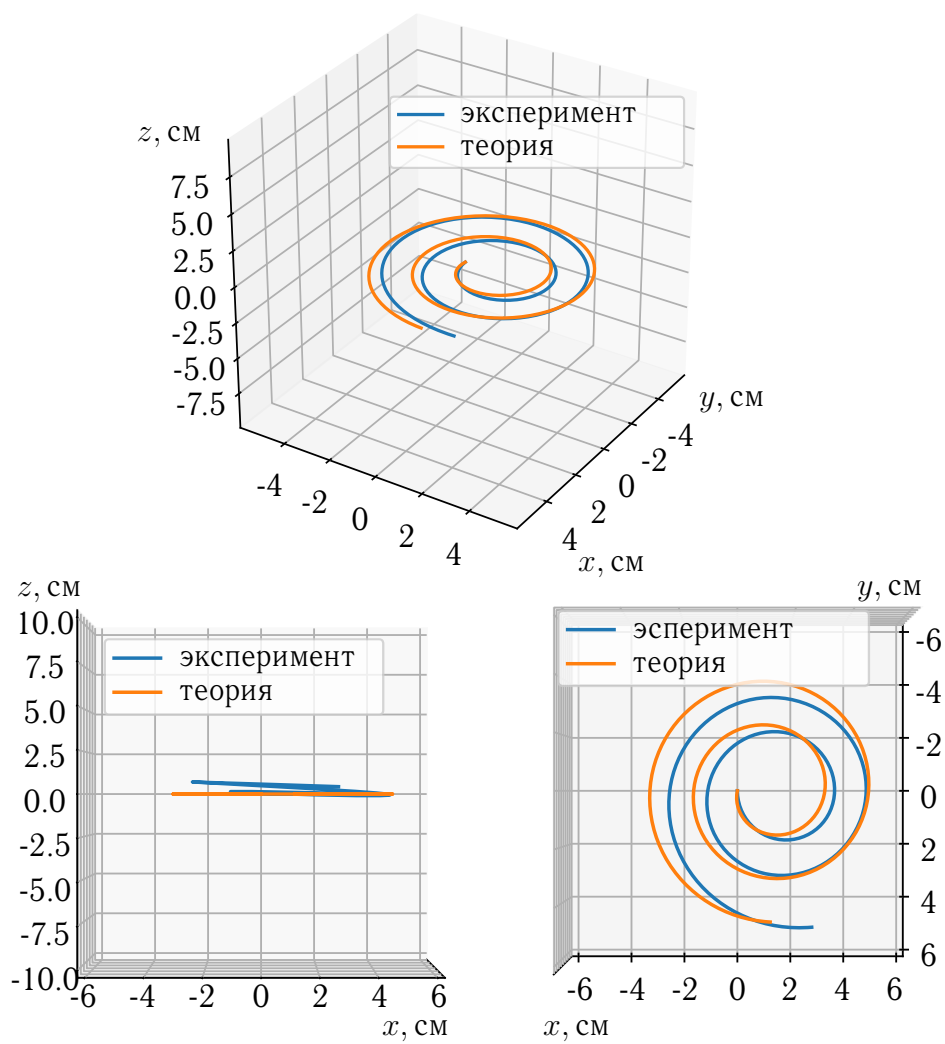


Рис. 13: Сравнение полученной с помощью датчика кривой и эталонной кривой.

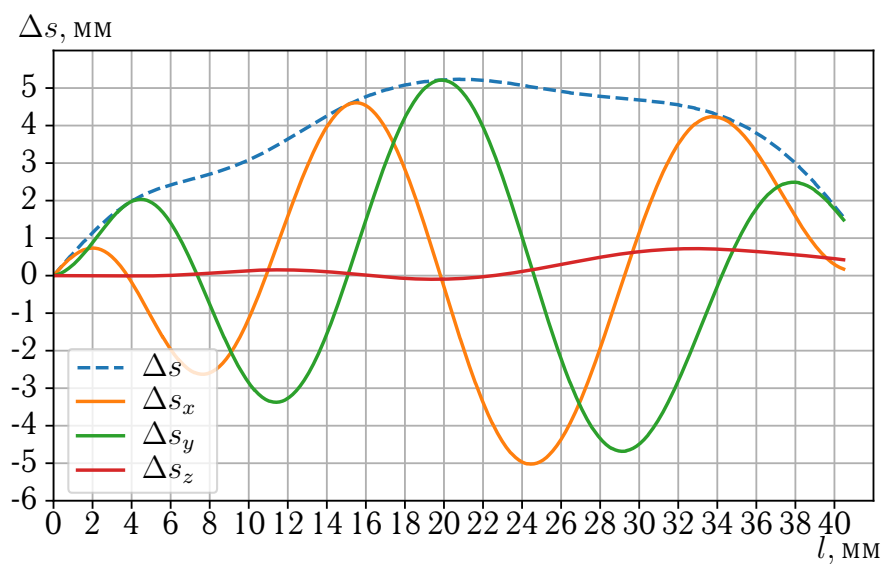


Рис. 14: Метрика Δs в зависимости от координаты вдоль кривых l . Максимальное отклонение 5.24 мм.

Трасса с изменением направления изгиба

В экспериментах второго типа трасса представляла собой участок в виде полуокружности с постоянным радиусом кривизны r_1 , гладко переходящей в прямой участок длины l , который в свою очередь гладко переходит в участок в виде полуокружности с радиусом кривизны r_2 , развернутый на угол $\phi_c = \pi$.

Параметры трех использованных в эксперименте трасс приведены ниже:

$$r_1 = 7.5 \text{ мм}, r_2 = 10 \text{ мм}, l = 12.5 \text{ мм}$$

$$r_1 = 7.5 \text{ мм}, r_2 = 12.5 \text{ мм}, l = 22.5 \text{ мм}$$

$$r_1 = 7.5 \text{ мм}, r_2 = 15 \text{ мм}, l = 32.5 \text{ мм}$$

График кривой, а так же фотография распечатанной трассы для эксперимента второго типа представлены на рис. 15.

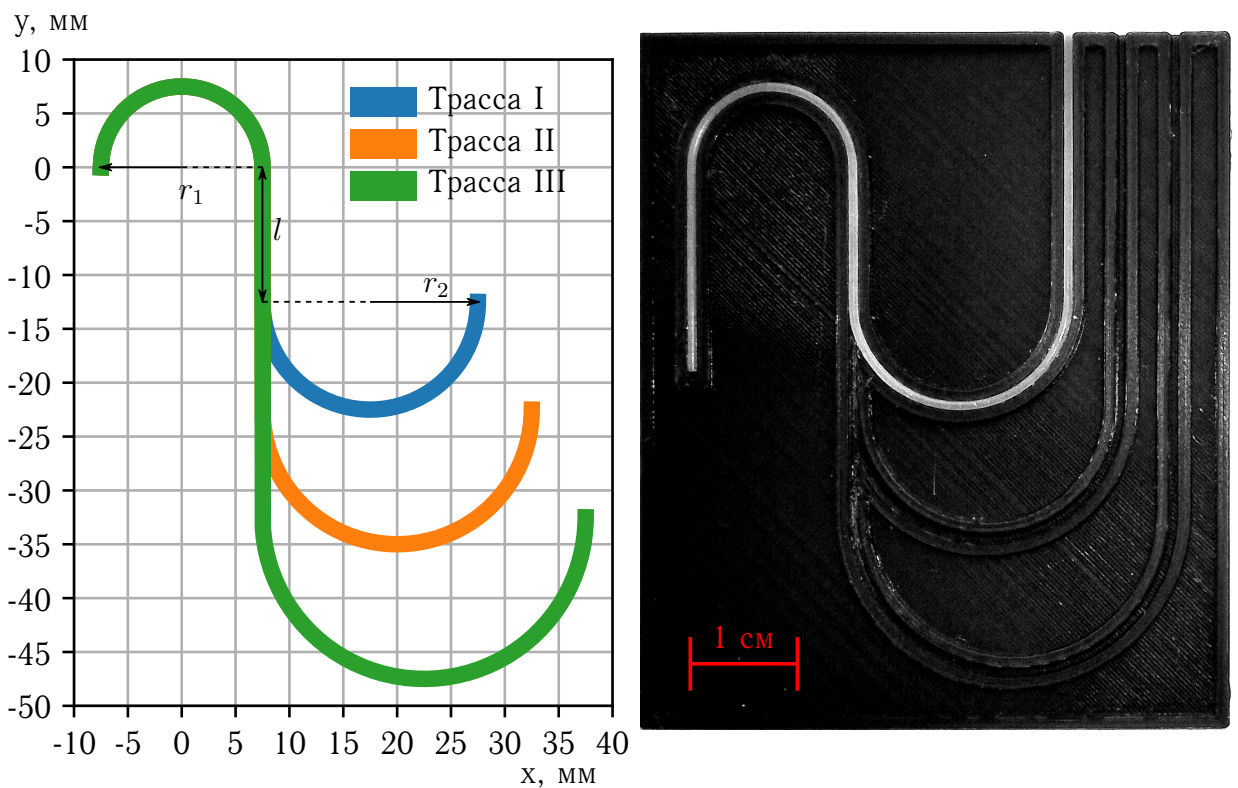


Рис. 15: График параметрически заданной кривой и распечатанная на 3D-принтере трасса.

Сравнение полученных кривых с эталоном представлено на рис. 16.

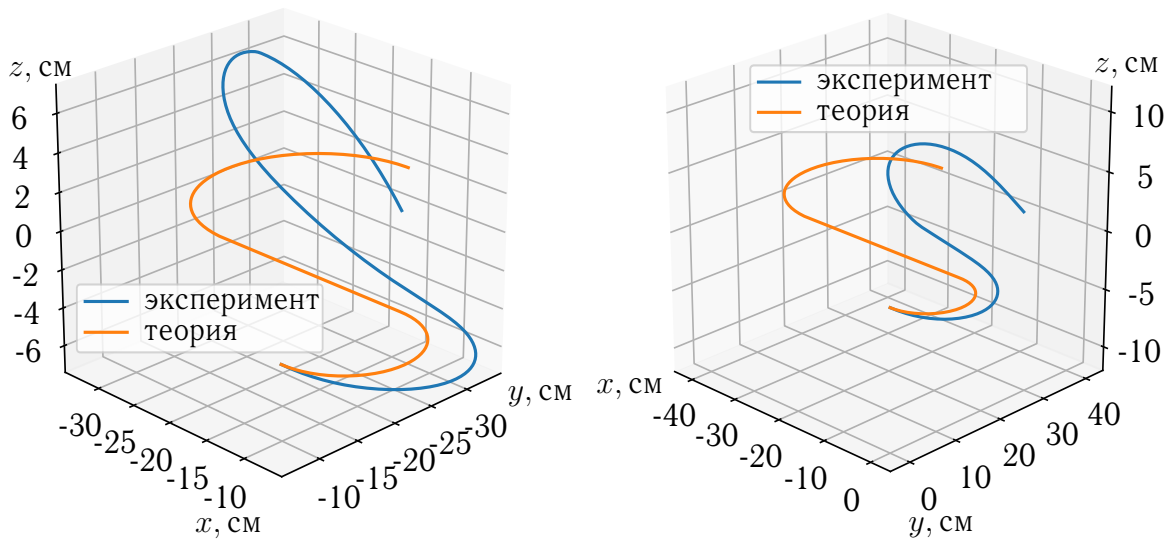


Рис. 16: Сравнение восстановленных системой кривых с эталонными кривыми.

Метрика Δs для экспериментов с кривой II представлена на рис. 17. Максимальное отклонение в данном случае составило 7.20 мм, по оси X 3.43 мм, по оси Y 6.92 мм, по оси Z 6.12 мм.

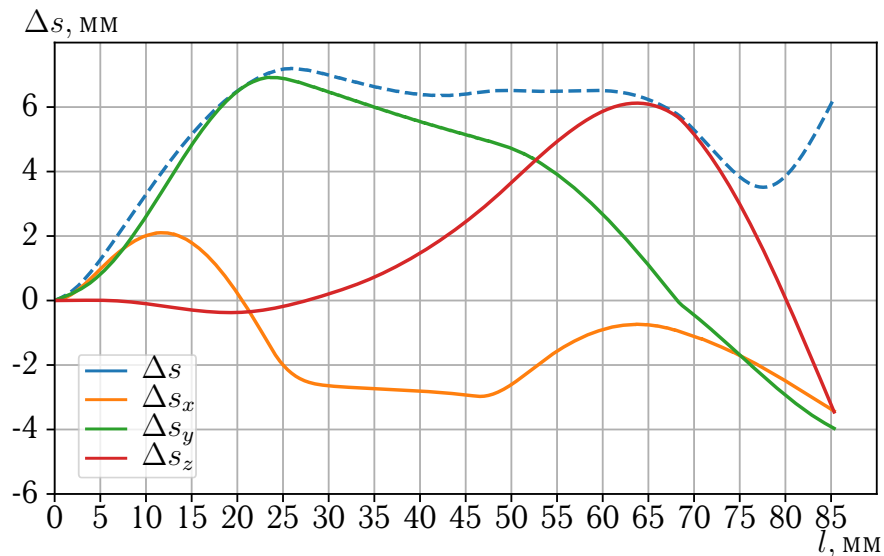


Рис. 17: Метрика Δs в зависимости от координаты вдоль кривых l для кривой II. Максимальные значения: общее 7.20 мм, по оси X 3.43 мм, по оси Y 6.92 мм, по оси Z 6.12 мм.

Метрика Δs для экспериментов с кривой III представлена на рис. 18. Максимальное отклонение в данном случае составило 23.80 мм, по оси X 23.39 мм, по оси Y 5.24 мм, по оси Z 5.29 мм.

Из сравнения кривых, а также из графика зависимости Δs можно заметить проявление проблемы скручивания, описанной в параграфе

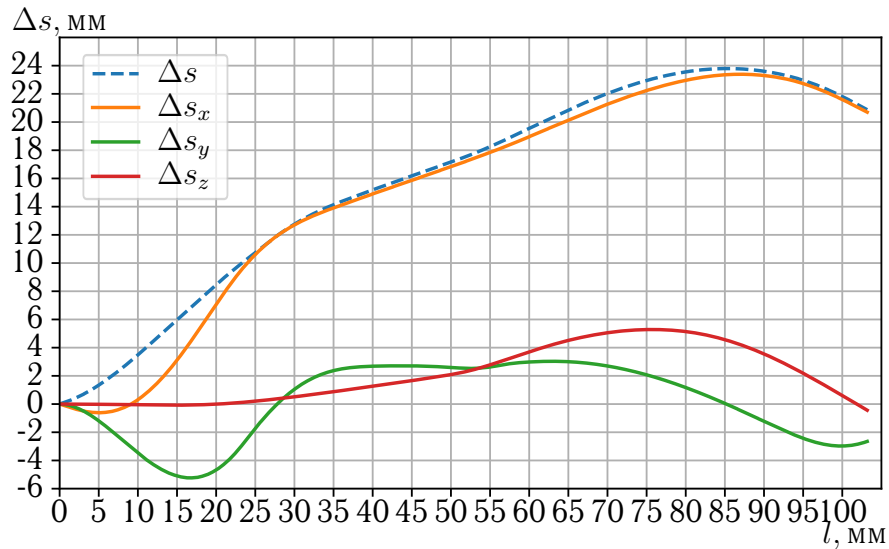


Рис. 18: Метрика Δs в зависимости от координаты вдоль кривых l для кривой III. Максимальные значения: общее 23.80 мм, по оси X 23.39 мм, по оси Y 5.24 мм, по оси Z 5.29 мм.

3.1: восстановленная кривая показывает низкое отклонение от эталонной кривой до момента резкого изменения угла поворота, после этого в датчике возникает скручивание и плоскость кривой эффективно поворачивается на угол скручивания.

В силу ошибки в проведении эксперимента, обработка данных с кривой I оказалась невозможна и результаты восстановления формы этой кривой не приводятся.

3.3 Восстановление формы кривой в трехмерном пространстве

Эксперимент в трехмерном случае включал в себя протяжку через единственную трассу, представляющую собой трехмерную спираль Архимеда. Система уравнений, описывающих спираль, представлена ниже:

$$\begin{aligned} t &\in \left[\frac{3\pi}{2}, 20 \right] \\ x &= t \cos(t) \\ y &= t \sin(t) \\ z &= t \end{aligned}$$

Для реализации данной трассы был распечатан полый усеченный конус с канавкой для тефлоновой трубки, идущей по поверхности вращения. Проекция трехмерной модели конуса представлены на рис. 19.

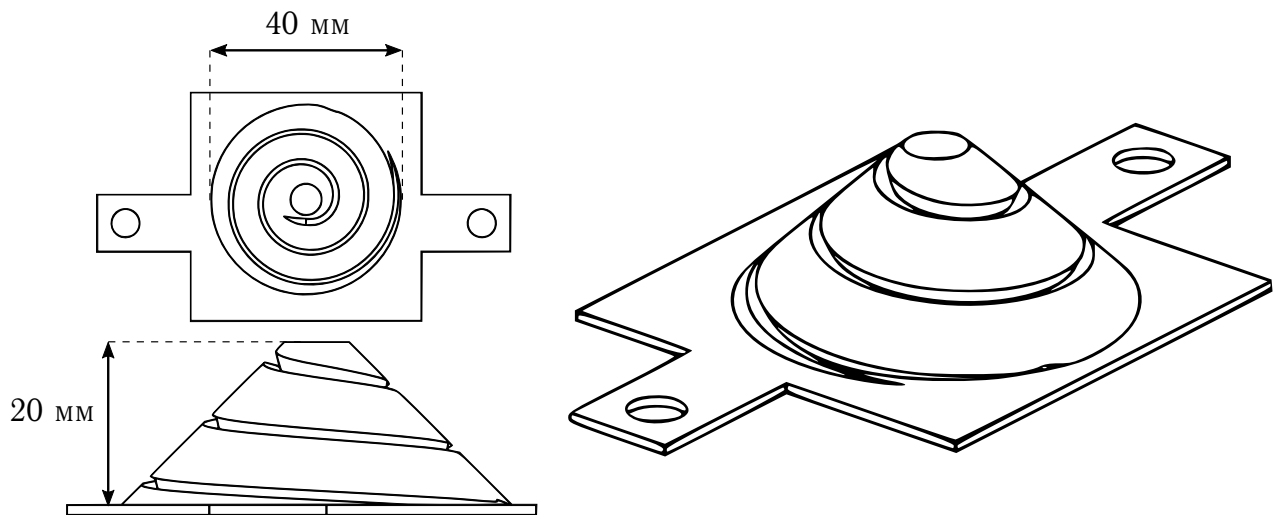


Рис. 19: Трехмерная модель распечатанной для эксперимента трассы.

Метрика Δs для экспериментов с трехмерной спиралью представлена на рис. 20. Максимальное отклонение в данном случае составило 8.44 мм, по оси X 7.20 мм, по оси Y 8.10 мм, по оси Z 0.22 мм.

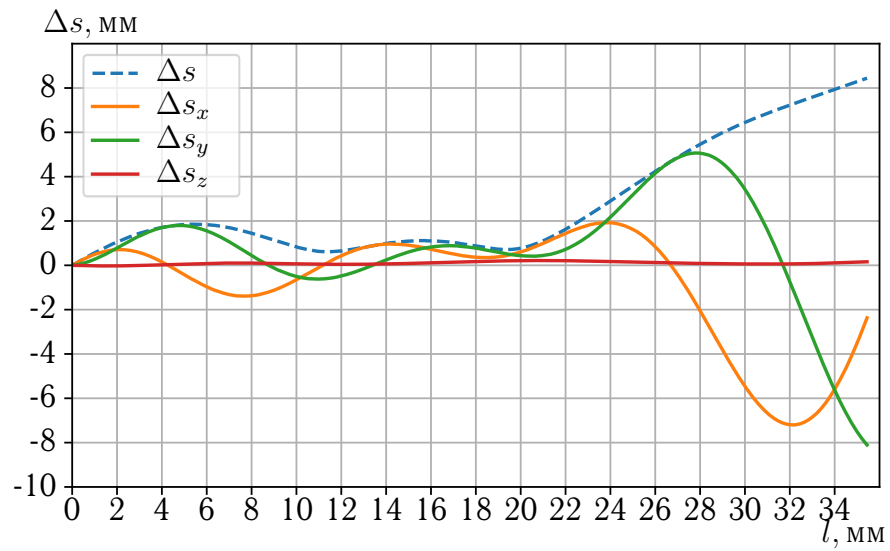


Рис. 20: Метрика Δs в зависимости от координаты вдоль кривых l для кривой трехмерной кривой. Максимальные значения: общее 8.44 мм, по оси X 7.20 мм, по оси Y 8.10 мм, по оси Z 0.22 мм.

Заключение

В ходе данной работы была разработана программно-аппаратная система для опроса и восстановления формы датчика изгибов на основе массива ВБР в многосердцевинном волокне. Система позволяет измерять изгибные деформации и восстанавливать форму оптического волокна в окрестности датчика изгибов.

Разработанная система была протестирована на одиночном датчике изгибных деформаций в схеме с протяжкой датчика через тефлоновую трубку, уложенную в трассу известной формы. Минимальный и максимальный радиус изгиба в эксперименте составил 7.5 мм и 20 мм соответственно. Результатом тестирования стала кривая отклонения восстанавливаемой формы трассы от эталонной в зависимости от расстояния вдоль трассы. Наибольшее отклонение от эталона составило 23.39 мм в двумерном случае и 8.44 мм в трехмерном случае.

Автором работы был разработан программный код, реализующий все этапы обработки данных, разработана модель восстановления формы волокна по значению кривизны в дискретных точках, собрана схема, написан код прошивки микроконтроллера и изготовлены трассы для экспериментов по верификации полученной системы, проведены эксперименты по верификации и обработаны данные. Результаты работы были представлены в ходе конференции МНСК-2018.

Список литературы

1. Saleh Bahaa E. A., Teich Malvin Carl. Fundamentals of Photonics. — USA : Academic Press, 2001.
2. Yin Shizhuo, Ruffin Paul B., Yu Francis T.S. Fiber Optic Sensors. — USA : CRC Pressc, 2002.
3. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors / Wei Liang, Yanyi Huang, Yong Xu et al. // Applied Physics Letters. — 2005. — Vol. 86, no. 15. — P. 1–3.
4. Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg gratings / D C Betz, G Thursby, B Culshaw, W J Staszewski // Smart Materials & Structures. — 2003. — Vol. 12, no. 1. — P. 122–128.
5. Zhang Zhengyi, Liu Chuntong. Design of vibration sensor based on fiber Bragg grating // Photonic Sensors. — 2017. — Dec. — Vol. 7, no. 4. — P. 345–349. — Access mode: <https://doi.org/10.1007/s13320-017-0416-2>.
6. Zhang Wentao. Fiber Bragg grating pressure sensor with ultrahigh sensitivity and reduced temperature sensitivity // Optical Engineering. — 2009. — Vol. 48, no. 2. — P. 024402. — Access mode: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.3081058>.
7. Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber. / G M H Flockhart, W N MacPherson, J S Barton et al. // Optics Letters. — 2003. — Vol. 28, no. 6. — P. 387–389.

8. Moore Jason P, Rogge Matthew D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions // Optics Express. — 2012. — Vol. 20, no. 3. — P. 2967.
9. Compact Optical Fiber 3D Shape Sensor Based on a Pair of Orthogonal Tilted Fiber Bragg Gratings / Dingyi Feng, Wenjun Zhou, Xueguang Qiao, Jacques Albert // Scientific Reports. — 2015. — dec. — Vol. 5, no. 1. — P. 17415. — Access mode: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84948699613\&partnerID=tZ0tx3y1http://www.nature.com/articles/srep17415>.
10. Temperature-compensated fiber-optic 3D shape sensor based on femtosecond laser direct-written Bragg grating waveguides. / Kenneth K C Lee, Adrian Mariampillai, Moez Haque et al. // Optics Express. — 2013. — Vol. 21, no. 20. — P. 24076–86. — Access mode: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24104316>.
11. Vector bending sensors based on fibre Bragg gratings inscribed by infrared femtosecond laser / A. Martinez, Y. Lai, M. Dubov et al. // Electronics Letters. — 2005. — Vol. 41, no. 8. — P. 472. — Access mode: http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el_{20058278.
12. Я. Буймистрюк Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий // Control Engineering. — 2013. — Т. 3, № 45. — С. 34–40.
13. Tosi Daniele. Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors // Sensors. — 2017. — oct. — Vol. 17, no. 10. — P. 2368. — Access mode: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2368>.
14. Gafsi R., El-Sherif M.A. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings // Optical Fiber Technology. — 2000. — Vol. 6,

no. 3. — P. 299–323. — Access mode: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S106852000090333X>.