

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 53.088

ИНТЕРРОГАТОР ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК НА
ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ВОЛНОВОДНОЙ РЕШЕТКИ НА
ФОТОННОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ: ДЕМОДУЛЯЦИЯ ПО
ОТНОШЕНИЯМ СОСЕДНИХ КАНАЛОВ И МЕЖСЕССИОННАЯ
ВАЛИДАЦИЯ¹

©2026 г. И. А. Казаков ^{a,b,*}, Е. Е. Ковалев ^{a,b,**}, А. В. Шипулин ^a

^a Сколковский институт науки и технологий

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

^b ООО “Файбер Пайн”

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

*E-mail: ivan.kazakov@skoltech.ru

**E-mail: egor.kovalev@skoltech.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 08.05.2026

Принята к публикации 23.06.2026

Представлен интеррогатор волоконных брэгговских решеток (ВБР) на основе дифракционной волноводной решетки (ДВР), реализованной на фотонной интегральной схеме. Рассмотрена задача восстановления центральной длины волны одной ВБР по откликам спектральных каналов ДВР. Исследован метод демодуляции, использующий отношения сигналов соседних каналов и кусочно-заданную градуировочную аппроксимацию, и выполнено его сравнение с методом средневзвешенного определения длины волны. Данные получены в двух измерительных сессиях с суммарным временным охватом около 10.5 дней. Показано, что метод отношений обеспечивает существенно более высокую точность: при случайном разбиении данных среднеквадратичная ошибка составила 2.4 пм против 24.7 пм для метода средневзвешенного определения длины волны, а при межсессионной валидации – 2.9 пм против 45.2 пм. Значение 95-го перцентиля абсолютной ошибки для метода отношений не превышало 6.0 пм. Полученные результаты подтверждают перспективность аналитической демодуляции на основе отношений соседних каналов для компактных интеррогаторов ВБР на фотонных интегральных схемах.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, интеррогатор, дифракционная волноводная решетка, фотонная интегральная схема, демодуляция длины волны, метод отношений каналов

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) и интеррогаторы на основе дифракционных волноводных решеток (ДВР, AWG) на фотонных интегральных схемах представляют интерес для создания компактных и быстродействующих сенсорных систем, в том числе для задач структурного мониторинга, транспорта, энергетики и аэрокосмических применений [1, 2]. Однако практическая точность демодуляции в таких системах ограничивается неидеальностью спектральных каналов ДВР и дрейфом измерительного тракта.

Переход от дискретной оптики к фотонной интеграции открывает возможность уменьшения массы, габаритов, энергопотребления и стоимости интеррогаторов [3, 4]. Одним из наиболее перспективных вариантов является пассивная архитектура на основе интегрального миниспектрометра ДВР, не требующая перестраиваемого источника и потенциально обеспечивающая высокую скорость работы [4, 5]. При этом точность восстановления длины волны ВБР в значительной степени определяется алгоритмом обработки сигналов. Во многих работах используется метод средневзвешенного определения длины волны (Center of Gravity, CoG) [6, 7], поэтому он используется в этой работе как референсный. Ранее для интеррогаторов на основе ДВР—также рассматривались алгоритмы демодуляции по отношению сигналов двух соседних каналов, основанные на гауссовом приближении спектральных откликов или на полуаналитической калибровке в пределах одной пары каналов [8]. В нашей предыдущей работе [9] был предложен аналитический подход, основанный на отношениях сигналов соседних каналов, а позднее было показано, что дополнительное повышение точности возможно с применением методов машинного обучения [10].

В настоящей работе рассматривается интеррогатор ВБР на основе ДВР и исследуется задача восстановления центральной длины волны одной ВБР по откликам каналов ДВР. Основное внимание уделено методу демодуляции по отношениям соседних каналов и его сравнению с методом средневзвешенного определения длины волны. Дополнительно выполнена межсессионная валидация на временно разнесенных данных, что позволяет оценить не только точность, но и устойчивость метода.

Тем самым работа направлена не только на демонстрацию принципа ДВР-интеррогатора на фотонной интегральной схеме, но и на экспериментальное подтверждение того, что

аналитический метод отношений обеспечивает заметное преимущество по точности и устойчивости по сравнению с известным методом средневзвешенного определения длины волны.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, внешний вид интеррогатора и установки для растяжения ВБР – на рис. 2. Исследуемый интеррогатор включает широкополосный источник излучения, оптический циркулятор, ВБР, ДВР, фотоприемную часть и систему сбора и обработки данных.

Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки, включающей интеррогатор на основе ДВР...

Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки...

В качестве источника использовался волоконный источник усиленного спонтанного излучения (Amplified Spontaneous Emission, ASE) Connet VASS-C-M-100-1-FA:SM (Китай), излучающий в диапазоне 1528–1561 нм. Через оптический циркулятор это излучение направлялось на волокно с ВБР. Отраженный от ВБР сигнал возвращался через циркулятор и подавался на вход ДВР (коммерческое название: “Оптический АAWG-ультимплексор”, производитель АО “ЗНТЦ”) на материальной платформе оксинитрида кремния. Используемая ДВР содержала 16 спектральных выходных каналов с характерной шириной около 0.6 нм и шагом между соседними каналами около 0.8 нм. Ширина спектра отражения исследуемой ВБР по уровню 3 дБ составляла около 0.2 нм.

Выходные каналы ДВР были подключены к фотодетекторам на основе GaAs-PIN-фотодиодов (Shengshi Optical) с трансимпедансными усилителями с резистивной обратной связью. Электрические сигналы оцифровывались встроенным 10-битным АЦП микроконтроллера ATmega2560 на отладочной плате Arduino Mega 2560 и передавались на персональный компьютер для последующей обработки. В качестве эталонного средства измерения длины волны использовался оптический анализатор спектра Anritsu MS9740B (Япония). Для контроля и компенсации его систематического дрейфа применялся перестраиваемый лазер Santec TSL-570 (Япония), спектр которого считывался с периодом 5 мин.

Используемая ДВР была размещена в термостабилизированном корпусе. В отдельных экспериментах была дополнительно оценена долговременная стабильность положения ее спектральных каналов. После компенсации дрейфа оптического анализатора спектра по перестраиваемому лазеру среднеквадратическое отклонение положения каналов ДВР составило

0.59 пм. Это значение ниже ошибки демодуляции, полученной в настоящей работе, и оно показывает, что в исследованных условиях итоговая ошибка определяется не только стабильностью ДВР, но и ограничениями используемой аналитической градуировки.

Для формирования градуировочного и тестового наборов данных использовалась автоматическая система управляемого растяжения волокна с ВБР, обеспечивающая воспроизводимое смещение центральной длины волны отражения примерно на 3 нм.

Принцип работы интеррогатора состоит в том, что при изменении механического натяжения волокна изменяется период ВБР, вследствие чего смещается центральная длина волны ее спектра отражения. Поскольку отраженный сигнал проходит через спектральный демультиплексор, оптическая мощность перераспределяется между соседними каналами ДВР. Регистрируемые сигналы Р1–Р16 далее используются для восстановления центральной длины волны ВБР.

Экспериментально измеренные спектральные отклики соседних каналов ДВР и спектры отражения ВБР в крайних положениях сканирования приведены на рис. 3. Видно, что рабочий сигнал ВБР перекрывает несколько соседних каналов, а формы их откликов отличаются от идеализированных симметричных зависимостей. Именно это делает необходимым применение специального алгоритма демодуляции и предварительной калибровки.

Рис. 3. Спектры соседних каналов ДВР и спектры отражения ВБР в крайних положениях

3. СБОР И ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для исследования алгоритмов демодуляции был сформирован экспериментальный набор данных для одной волоконной брэгговской решетки – ВБР1. Измерения выполнялись в двух независимых сессиях общей длительностью около 10 дней 12 ч. Между окончанием первой и началом второй сессии имелся временной разрыв, равный 4 дня 9 ч, что позволило использовать вторую сессию как независимую проверку устойчивости метода к временному дрейфу условий измерения.

В исходном виде были загружены данные 65648 измерительных событий. После исключения записей с ошибками, удаления начального участка, соответствующего разогреву и выходу оборудования на стационарный режим, а также обрезки под рабочий диапазон длин волн для исследуемых алгоритмов, т. е. область между соседними каналами ДВР, был сформирован очищенный набор данных для ВБР1 объемом 33809 точек. При этом на первую сессию

приходилось 16247 точек, на вторую – 17562 точки. Итоговый рабочий набор охватывает диапазон длин волн от 1538.73 до 1541.74 нм, равный 3.01 нм.

На рис. 4а показаны экспериментальные зависимости сигналов выбранных каналов P1–P5 от центральной длины волны ВБР1. Видно, что при смещении спектра отражения ВБР сигнал последовательно перераспределяется между соседними каналами ДВР, что и лежит в основе методов демодуляции.

Рис. 4. Экспериментальные данные для ВБР1 и метода отношений

Для оценки качества методов использовались два протокола разбиения данных: случайное разбиение рабочего набора на обучающую и тестовую выборки в отношении 70/30 и разбиение по сессиям, при котором первая сессия использовалась для градуировки, а вторая – для независимого тестирования. Основные характеристики используемых наборов данных приведены в табл. 1.

Табл. 1. Основные характеристики экспериментальных наборов данных, использованных для обучения и тестирования методов демодуляции

Датасет	Длительность	Диапазон длин волн, нм	Число точек
Объединенный набор: сессия 1 и сессия 2	10 дней 12 ч	1538.73–1541.74	33809
Сессия 1	2 дня 13 ч	1538.73–1541.74	16247
Сессия 2	3 дня 14 ч	1538.73–1541.74	17562

4. АЛГОРИТМЫ ДЕМОДУЛЯЦИИ

В работе сопоставлялись два подхода к восстановлению центральной длины волны ВБР по многоканальному отклику ДВР: метод средневзвешенного определения длины волны и аналитический метод отношений соседних каналов. Более подробное описание архитектуры интеррогатора и ранней версии аналитического подхода приведено в работе [7], а расширенный анализ калибровки и сопоставления методов – в работе [8]. В настоящей работе кратко описаны методы, а основное внимание уделено их сравнению с описанным в литературе методом средневзвешенного, причем на длительных разнесенных по времени экспериментальных данных.

В качестве опорного подхода используется метод средневзвешенного определения длины волны, перед вычислением функции которого из сигналов каналов вычитался базовый уровень, а

для самих каналов использовались эффективные положения максимумов, определенные по результатам предварительной аппроксимации спектральных откликов ДВР.

Основным исследуемым методом являлся аналитический подход, основанный на использовании отношений сигналов соседних каналов. Он реализовывался в два этапа. На первом этапе определялась активная секция рабочего диапазона, т. е. область между максимумами откликов каналов, в которой отраженный сигнал ВБР преимущественно распределен между соответствующей парой соседних каналов. Для этого использовались отношения сигналов через один канал, поскольку такие зависимости сохраняют ненулевую производную в области границ между соседними секциями и позволяют устойчиво различать рабочие области. На втором этапе внутри выбранной секции длина волны восстанавливалась по локальной градуировочной зависимости, построенной для отношения сигналов соответствующей пары соседних каналов.

В качестве информативного признака на втором этапе использовалась величина

$$R_i(\lambda) = \ln(P_{(i+1)}/P_i),$$

где P_i и $P_{(i+1)}$ – сигналы от двух соседних каналов. Как показано на рис. 4, общий рабочий диапазон разбивался на несколько секций, в каждой из которых использовалась своя пара соседних каналов: R12, R23, R34, R45. Для каждой секции строилась индивидуальная градуировочная зависимость между отношением сигналов и центральной длиной волны ВБР. В общем виде задача демодуляции в пределах k -й секции записывалась следующим образом:

$$\hat{\lambda}_k = f_k^{(-1)}(R_k),$$

где f_k – градуировочная функция, полученная по экспериментальным данным для соответствующей пары каналов. Таким образом, метод сочетает грубую детекцию области и последующую локальную демодуляцию по секционной градуировочной кривой, что позволяет уменьшить влияние неидеальности полного многоканального отклика ДВР и использовать только те участки сигнала, где зависимость между длиной волны и отношением соседних каналов является наиболее устойчивой.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ МЕТОДОВ

Результаты сравнения метода отношений соседних каналов и метода средневзвешенного определения длины волны приведены в табл. 2 и на рис. 5, 6. Сопоставление выполнялось в двух сценариях: при случайном разбиении рабочего набора данных и при межсессионной валидации,

когда калибровка строилась по первой измерительной сессии, а тестирование проводилось по второй сессии, полученной спустя несколько суток.

Таблица 2. Сводное сравнение метода отношений соседних каналов и метода средневзвешенного определения длины волны по основным метрикам

Разделение датасета	Метод	СКО, пм	P95, пм	Смещение, пм
Случайное	Отношение сигналов	2.4	5.0	−0.04
	Средневзвешенное	24.7	52.2	−1.22
По сессиям	Отношение сигналов	2.9	6.0	1.39
	Средневзвешенное	45.2	89.6	10.27

Рис. 5. Сравнение ошибок метода средневзвешенного определения длины волны и метода отношений соседних каналов на тестовых данных...

Рис. 6. Ошибка метода отношений соседних каналов на тестовых данных второй измерительной сессии как функция времени от начала теста...

Из табл. 2 следует, что метод отношений во всех рассмотренных случаях существенно превосходит метод средневзвешенного определения длины волны по всем основным метрикам. При случайном разбиении среднеквадратичная ошибка метода отношений составила 2.4 пм, тогда как для метода средневзвешенного определения длины волны она достигала 24.7 пм. Значение 95-го перцентиля абсолютной ошибки составило 5.0 пм против 52.2 пм соответственно. Смещение для метода отношений оказалось близким к нулю и составило −0.04 пм.

В более жестком сценарии межсессионной проверки метод отношений также сохранил высокое качество демодуляции. Среднеквадратичная ошибка составила 2.9 пм, 95-й перцентиль абсолютной ошибки – 6.0 пм, а смещение – 1.39 пм. Для метода средневзвешенного определения длины волны соответствующие значения были существенно хуже: 45.2 пм, 89.6 пм и 10.27 пм. Таким образом, метод отношений обеспечивает не только более высокую точность, но и заметно лучшую устойчивость на разнесенных по времени данных.

На рис. 5а показана ошибка демодуляции как функция истинной центральной длины волны ВБР. Для метода средневзвешенного определения длины волны наблюдается выраженная систематическая зависимость ошибки от положения в спектральном диапазоне, особенно заметная вблизи его краев. Для метода отношений ошибка остается сосредоточенной в узкой

полосе вблизи нуля практически по всему рабочему диапазону, однако локальное увеличение ошибки наблюдается вблизи границ секций. Это согласуется с рис. 4б: в окрестности краев секций градуировочные кривые становятся менее крутыми, т. е. их производная по длине волны уменьшается. В этих областях та же по величине ошибка по отношению сигналов приводит к большей ошибке восстановления длины волны, что и проявляется в виде локального расширения полосы ошибок на рис. 5а. Гистограммы на рис. 5б подтверждают этот вывод: распределение ошибок для метода отношений значительно уже, и оно сконцентрировано вблизи нулевого значения, тогда как для метода средневзвешенного определения длины волны оно заметно шире и имеет длинные хвосты.

Дополнительная проверка устойчивости метода отношений приведена на рис. 6, где показана ошибка на тестовых данных второй измерительной сессии как функция времени. Видно, что даже на протяжении длительного временного интервала ошибка остается в относительно узком диапазоне, а скользящая медиана сохраняется вблизи нуля. Наблюдаемое локальное увеличение разброса не приводит к существенному ухудшению итоговых метрик. Это подтверждает, что метод отношений сохраняет работоспособность и после разнесения по времени калибровочной и тестовой сессий.

Следует отметить, что достигнутые значения среднеквадратичного отклонения в диапазоне 2.4–2.9 пм соответствуют пикометровому классу точности, характерному для современных коммерческих ВБР-опросчиков. По открытым спецификациям для ряда систем заявляются ориентировочные характеристики порядка 1–5 пм, а для компактных фотонно-интегральных решений – порядка нескольких пикометров. При этом прямое сопоставление ограничено различием архитектур и используемых метрик, поскольку производители обычно приводят величины точности, воспроизводимости или разрешения, а не среднеквадратичного отклонения.

6. ВЫВОДЫ

В работе экспериментально исследован интеррогатор волоконных брэгговских решеток на основе дифракционной волноводной решетки, реализованной на фотонной интегральной схеме, и рассмотрена задача восстановления центральной длины волны одной ВБР по многоканальному отклику ДВР.

Сформирован и подготовлен экспериментальный набор данных, включающий две измерительные сессии общей длительностью около 10 дней 12 ч, что позволило оценить не только достижимую точность методов, но и их устойчивость на временно разнесенных данных.

Показано, что аналитический метод отношений соседних каналов существенно превосходит метод средневзвешенного определения длины волны по всем основным метрикам как при случайном разбиении данных, так и при межсессионной валидации. Для метода отношений достигнуты значения среднеквадратичной ошибки (СКО) 2.4–2.9 пм, тогда как для метода средневзвешенного определения длины волны ошибка составила 24.7–45.2 пм. Значения 95-го перцентиля абсолютной ошибки также оказались существенно ниже для метода отношений. По сравнению с методом средневзвешенного определения длины волны предложенный подход обеспечивает уменьшение СКО примерно в 10 раз при случайном разбиении и сохраняет пикометрическую точность при межсессионной валидации.

Полученные результаты показывают, что метод отношений лучше соответствует физике работы ДВР-интеррогатора в ограниченном рабочем диапазоне, поскольку он использует локальное перераспределение мощности между соседними каналами и в меньшей степени чувствителен к неидеальности полного многоканального отклика. Установлено, что метод сохраняет высокое качество демодуляции и после временного разнесения калибровочной и тестовой сессий, что подтверждает его устойчивость к дрейфу условий измерения и практическую применимость.

Воспроизводимость на нескольких экземплярах интеррогатора в настоящей работе не исследовалась, поскольку на момент проведения экспериментов был изготовлен и испытан один прототип, оценка межприборной воспроизводимости является предметом дальнейшей работы.

Таким образом, результаты работы подтверждают перспективность использования аналитической демодуляции на основе отношений соседних каналов для компактных интеррогаторов ВБР на фотонных интегральных схемах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование не имело спонсорской поддержки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gizatulin A.R., Davletgareev I.A., Faskhutdinova Z.A., Sinitsin D.A., Salikhov A.I.* Proc. SPIE 13738, 137380B (2025). <https://doi.org/10.1117/12.3067280>
2. *2*Malakhov K., Popova I., Meleshko T. et al.* Chin. Opt. Lett. 2026. V. 24. № 3. P. 030011. <https://doi.org/10.3788/COL202624.030011>
3. *Гаськов М.П., Кондаков А.А., Салгаева У.О., Лобач И.А.* Фотон-Экспресс. 2023. № 6 (190). С. 133. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54512553>
[*Gas'kov M.P., Kondakov A.A., Salgaeva U.O., Lobach I.A.* Foton-Ekspress. 2023. № 6. P. 133.]
4. *Norman D.C.C., Webb D.J., Pechstedt R.D.* Meas. Sci. Technol. 2005. V. 16. P. 691. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/3/011>
5. *5*Pustakhod D., Kleijn E., Williams K., Leijtens X.* IEEE Photon. Technol. Lett. 2016. V. 28. P. 2203. <https://doi.org/10.1109/LPT.2016.2587812>
6. *Trita A., Voet E., Vermeiren J. et al.* IEEE Photon. J. 2015. V. 7. P. 7802611. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2499546>
7. *Zhuang Y., Zou J., Zhang J. et al.* Photonic Sens. 2024. V. 14. P. 240126. <https://doi.org/10.1007/s13320-023-0694-9>
8. *Gaskov M.P., Kondakov A.A., Salgaeva U.O., Lobach I.A.* IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Material. 2023. P. 910. <https://doi.org/10.1109/EDM58354.2023.10225072>
9. *Кзаков И.А., Малахов К.М., Ковалев Е.Е. и др.* Фотоника. 2024. Т. 18. № 2. С. 122 <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.122.135>
[*Kazakov I.A., Malakhov K.M., Kovalev E.E. et al.* Photonics Russia. 2024. V. 18(2). P. 122. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.122.135>]
10. *Kazakov I.A., Kulichenko I.V., Kovalev E.E. et al.* IEEE Sens. Lett. 2025. V. 9. № 8. P. 1. <https://doi.org/10.1109/LSSENS.2025.3585057>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Общая схема экспериментальной установки, включающей интеррогатор на основе ДВР на фотонной интегральной схеме и систему автоматического растяжения волокна с ВБР
- Рис. 2.** Внешний вид экспериментальной установки: **а** – прототип интеррогатора в разобранном (сервисном) виде с оптической и электронной частями, **б** – общий вид измерительной системы, **в** – автоматизированная система управляемого растяжения волокна с ВБР
- Рис. 3.** Спектры соседних каналов ДВР (цветные кривые, левая шкала) и спектры отражения ВБР (черные кривые, правая шкала) в крайних положениях сканирования в исследуемом диапазоне длин волн
- Рис. 4.** Экспериментальные данные для ВБР1 и метода отношений: **а** – отклики каналов Р1–Р5 и рабочие секции метода отношений, **б** – градуировочные кривые по секциям метода отношений
- Рис. 5.** Сравнение ошибок метода средневзвешенного определения длины волны (красный цвет) и метода отношений соседних каналов на тестовых данных (синий цвет): **а** – ошибка демодуляции как функция истинной центральной длины волны ВБР, **б** – гистограммы распределения ошибок
- Рис. 6.** Ошибка метода отношений соседних каналов на тестовых данных второй измерительной сессии как функция времени от начала теста; показаны отдельные точки, скользящая медиана (синий цвет) и границы по уровню абсолютной ошибки 95% (красные штрихи)

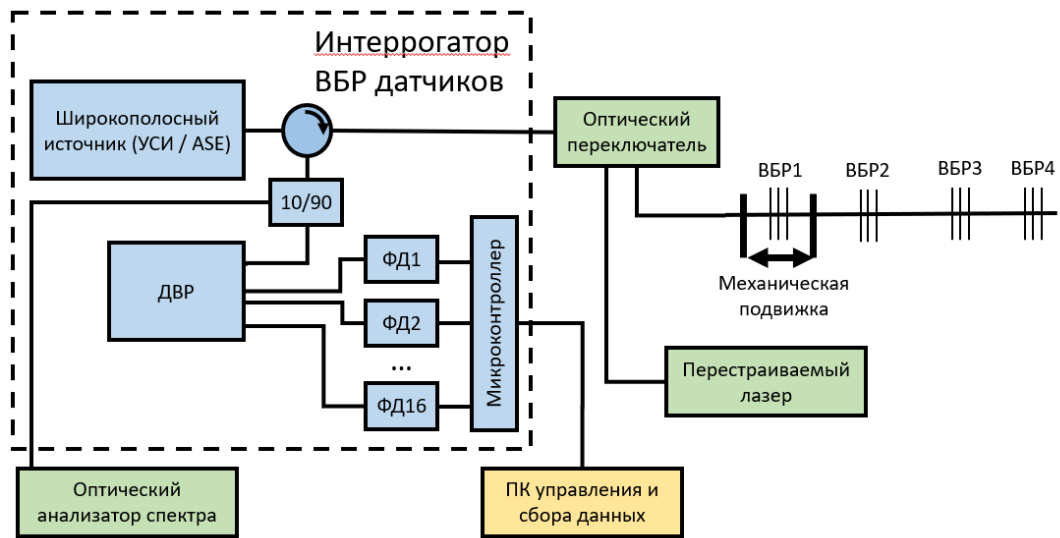


Рис. 1

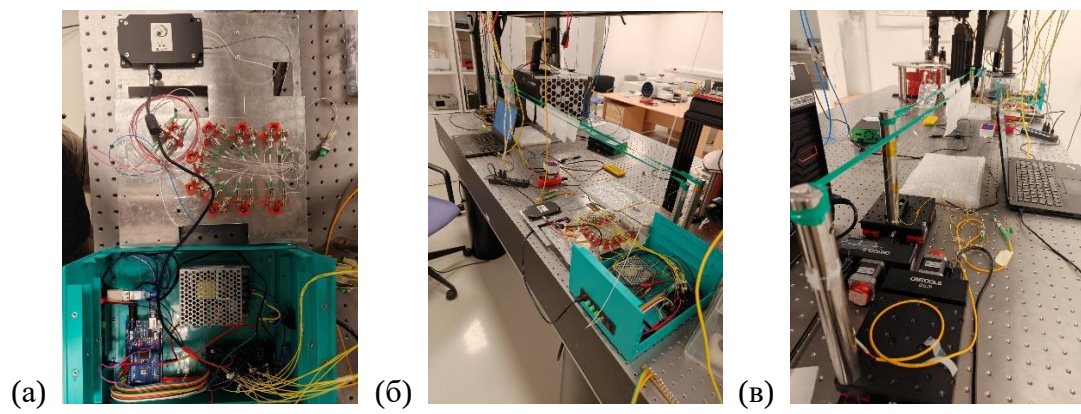


Рис. 2.

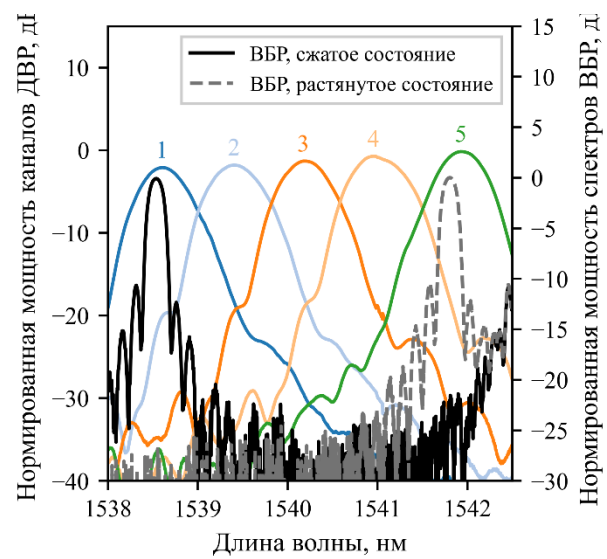


Рис. 3

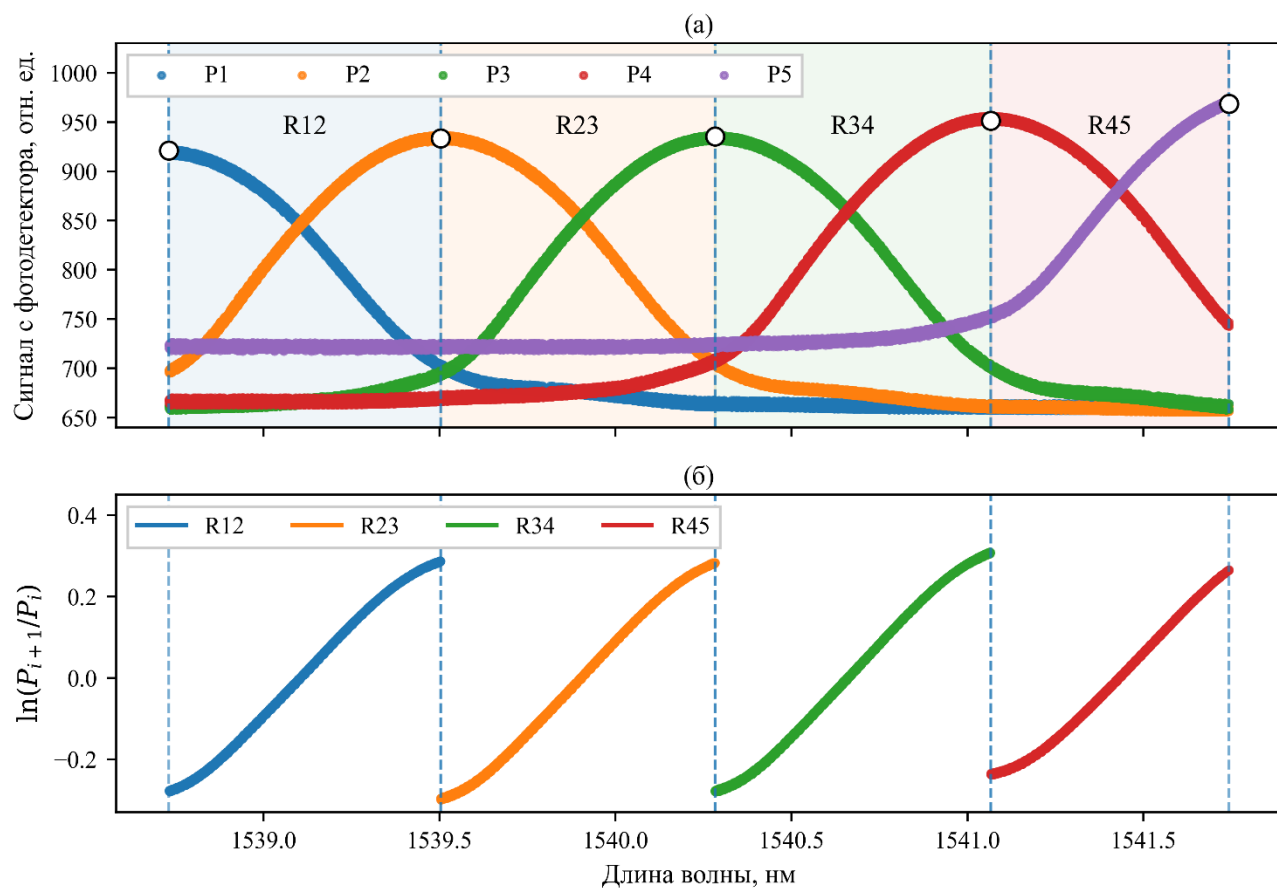


Рис. 4

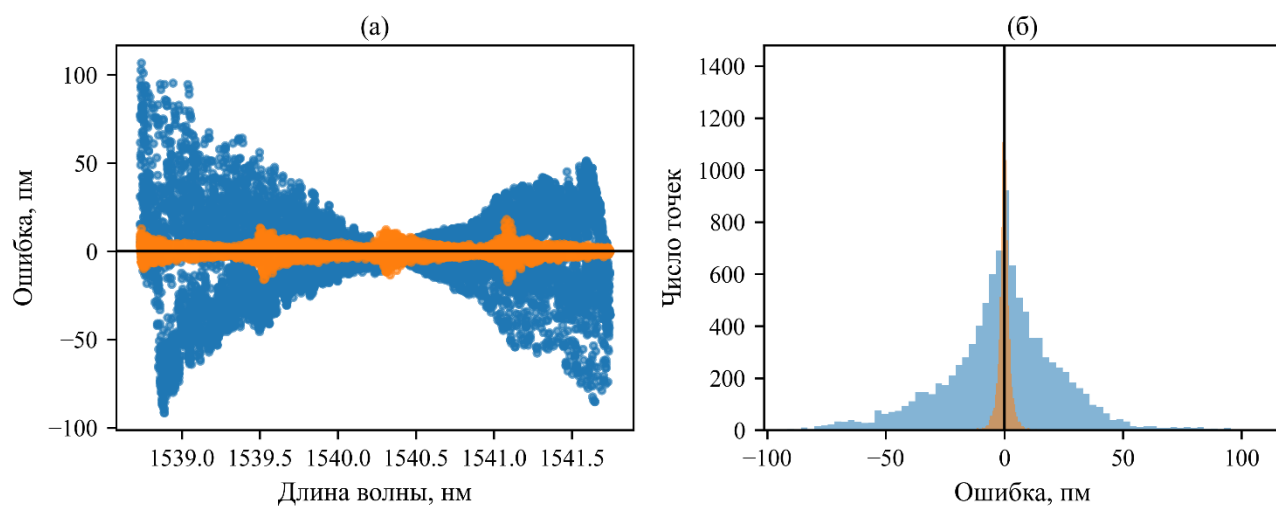


Рис. 5

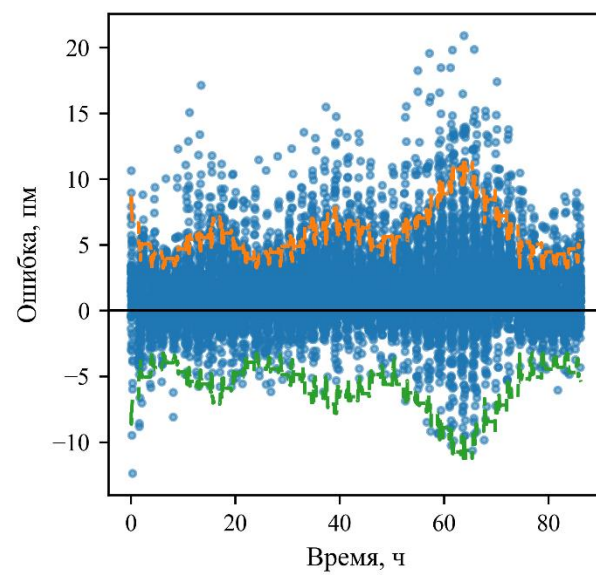


Рис. 6