На правах рукописи

КАЗАКОВ ВАСИЛИЙ ИВАНОВИЧ

Система оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель: **Москалец Олег Дмитриевич**
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Официальные оппоненты: **Рудинский Александр Вадимович**
Доктор технических наук, академик РАЕ, начальник бюро технических исследований закрытое акционерное общество «Научно-производственный центр «Аквамарин»

Гаврилов Геннадий Андреевич
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник лаборатории оптоэлектроники и голографии федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Ведущая организация: **Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Вектор»**, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, д.14а

Защита диссертации состоится «01» октября 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д.212.233.01 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «ГУАП». Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета http://guap.ru

Автореферат разослан «28» августа 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.01
доктор технических наук, профессор Д.К. Шелест

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Применение методов оптического неразрушающего контроля чрезвычайно широко распространено в различных областях науки, техники и промышленности. Среди различных методов оптического контроля следует выделить спектральный метод, который связан с изучением спектральных характеристик эмиссионного, отраженного или прошедшего объект контроля оптического излучения и исследованием по полученному спектру информации о его состоянии.

Спектральный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами оптического контроля:

- ✓ Метод позволяет осуществлять контроль в режиме реального времени. Это особо актуально, когда требуется минимальное время для получения информации об изменении состояния контролируемого процесса или объекта.
- ✓ В ряде случаев метод является единственно возможным, например, при изучении и контроле удаленных или труднодоступных объектов.
- ✓ Технические средства контроля оптическим спектральным методом обладают высоким быстродействием и малой инерционностью, что весьма актуально при контроле быстропротекающих процессов или в случае, когда необходимо очень быстрое срабатывание аппаратуры защиты для предотвращения критических ситуаций на опасных объектах.
- ✓ Метод позволяет не нарушать физических и химических условий на контролируемом объекте, т.е. не вносить возмущений в исследуемую среду.

В развитие методов оптической спектроскопии и спектрального приборостроения внесли значительный научный вклад К.И. Тарасов, В.И. Малышев, И.В. Скоков, В.В. Лебедева, Н.К. Павлычева, Ю.М. Беляков, И.В. Пейсахсон, С.Г. Раутиан, О.Д. Москалец, J. Hebling, Z. Marton и др.

Среди аппаратуры оптического спектрального контроля в оптическом диапазоне следует выделить спектральный прибор с дифракционной решеткой, который является одним из самых распространенных типов оптических спектральных приборов, применяемых в самых различных областях научных исследований. Прибор этого типа позволяет осуществлять мульти- и гиперспектральный контроль, т.е. имеет возможность контроля множества очень узких спектров излучения или поглощения (например, спектральных линий атомов и молекул) в широком диапазоне анализируемых частот (длин волн).

Среди работ, посвященным развитию дифракционных решеток и спектральных приборов на их базе, следует выделить труды российских ученых: Сойфера В.А., Соколовой Е.А., Боброва С.Т., Туркевич Ю.Г., а также зарубежных ученых N. Gao, C. Xie, E. Loewen, C. Palmer и др.

Одной из основных характеристик аппаратуры оптического спектрального контроля является разрешающая способность, поэтому задача улучшения и совершенствования этой характеристики является непреходящей и актуальной. К сожалению, разрешающая способность прибора с дифракционной решеткой ограничивается работой в первом или, в лучшем случае, втором дифракционном порядке, так как интенсивность дифрагированного света в более высокие порядки значительно убывает. Таким образом, в настоящее существует проблема, заключающаяся в необходимости разработки дифракционных решеток нового типа, позволяющих успешно выполнять спектральные измерения в высоких дифракционных порядках (третьем или даже четвертом), где разрешающая способность прибора значительно лучше.

В ряде случаев процедура контроля требует размещения прибора в неблагоприятных для него условиях. Под такими условиями понимаются: повышенная

температура или влажность, наличие агрессивной химической среды, высокий уровень вибраций и т.д. Негативное воздействие этих условий на спектральный прибор неизбежно ведет к ухудшению разрешающей способности, а значит, теряется часть получаемой информации о состоянии контролируемого процесса или объекта. Устранение негативного влияния на прибор возможно за счет выполнения бесконтактного измерения спектра, когда прибор помещен вне зоны действия неблагоприятных условий, а излучение от контролируемого объекта на вход прибора передается по волоконно-оптической системе передачи (ВОСП).

В этом случае нельзя игнорировать появление и влияние частотных и пространственных искажений, вызванных передачей сигнала по ВОСП, на результат спектральных измерений, что требует введения дополнительной их коррекции. Кроме того, не решен вопрос определения энергетических потерь в системе вывода излучения из ВОСП, а также не разработана методика расчета параметров оптических элементов системы вывода излучения из ВОСП для минимизации этих потерь. Эти вопросы также требуют своего решения и дальнейшей разработки.

В диссертационной работе предложено, исследовано и обосновано использование спектрального прибора с высокопорядковой дифракционной решеткой в системе бесконтактного спектрального контроля с ВОСП, решающее указанные проблемные задачи.

Цель работы: повышение разрешающей способности бесконтактного оптического спектрального метода контроля за счет измерения спектров в высоких дифракционных порядках.

Объектом исследования является система бесконтактного оптического контроля на базе спектрального прибора с высокопорядковой дифракционной решеткой.

Предмет исследования – метод формирования дифракционных спектров высоких порядков в системе оптического спектрального контроля.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Аналитический обзор современного состояния методов и аппаратуры контроля на основе оптической спектроскопии и их сопоставление по основным характеристикам.

2. Разработка математической модели спектрального преобразования и детектирования, реализованного в спектральном приборе с дифракционной решеткой, и определение пути дальнейшего повышения разрешающей способности прибора.

3. Исследование и разработка методики формирования топологии дифракционной решетки, позволяющей выполнять анализ в высоких дифракционных порядках.

4. Установление влияния искажений анализируемого оптического сигнала при передаче по ВОСП на результат спектральных измерений. Определение энергетических потерь в ВОСП.

5. Разработка лабораторного макета системы бесконтактного контроля на базе спектрального прибора с высокопорядковой дифракционной решеткой и экспериментальные исследования по измерению спектров тестовых источников этой системой.

Методы решения задач

При подготовке диссертации были использованы научные методы: радиооптики, системного подхода, теории линейных систем, волоконной оптики, когерентной оптики, теории сигналов, теории интегралов Фурье, компьютерного моделирования и физического эксперимента.

Научная новизна работы

1. Предложена математическая модель процесса спектрального преобразования, реализованного в спектральном приборе с дифракционной решеткой, на основе ранее не применявшегося в оптической спектрометрии математического аппарата (теория

сигналов, теория линейных систем, теория функций с двойной ортогональностью), что позволило установить связь между оптическим сигналом, падающим на вход прибора и представленного в виде комплексного спектра, и его энергетическим аппаратурным спектром, регистрируемым спектральным прибором.

2. На базе разработанной математической модели и представления функции пропускания дифракционной решетки в виде разложения в экспоненциальный ряд Фурье на ее апертуре установлены важнейшие свойства комплексных спектров в различных дифракционных порядках и способ повышения разрешающей способности прибора путем введения пространственной модуляции функции пропускания дифракционной решетки.

3. Предложена методика формирования топологии дифракционной решетки, заключающаяся в периодическом неэквидистантном расположении прозрачных и непрозрачных полос дифракционной решетки разной ширины, что позволило увеличить интенсивность дифрагированного света в третий и четвертый дифракционные порядки и, тем самым, повысить разрешающую способность прибора. Новизна предложенной реализации топологии решетки подтверждена полученным Патентом РФ №181375.

4. Разработана математическая модель распространения излучения в оптической системе вывода излучения из ВОСП на основе ее представления в виде оптического когерентного Фурье-процессора и преобразовании гауссова распределения поля от торца волокна этой системой, что позволило оценить уширение аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой в случае использования ВОСП.

5. Предложена методика расчета параметров оптических элементов системы вывода излучения из ВОСП, учитывающая дифракционную расходимость оптического излучения от торца волокна, и проведены экспериментальные исследования, позволяющие минимизировать энергетические потери.

6. Процедура считывания спектрометрической информации с помощью ПЗС-линейки впервые рассмотрена как операция пространственной частотной фильтрации каждым элементом (пикселем) с дальнейшим квадратичным детектированием и временным интегрированием, что позволило установить результат считывания в форме отсчетных значений энергетического спектра.

7. Предложен алгоритм последетекторной обработки результатов считывания оптического спектра, заключающийся в пересчете пространственной шкалы в частотную в виде нелинейного преобразования, а также учитывающий неравномерность спектральной чувствительности ПЗС-линейки и частотной характеристики ВОСП, что позволяет производить коррекцию результатов спектрометрических измерений.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается их непротиворечивостью ранее известным положениям, применением в процессе исследований адекватных физических и математических моделей, корректным использованием современных методов компьютерного моделирования и физического эксперимента, а также экспериментальным подтверждением полученных теоретических результатов и положительными результатами внедрения.

Практическая значимость диссертационной работы

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при разработке технических средств контроля оптическим спектральным методом на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой с улучшенной разрешающей способностью. Результаты диссертации могут быть также полезны как для специалистов, занимающихся расчетом, проектированием и изготовлением спектральных приборов, так и для широкого круга пользователей спектральной аппаратуры.

2. Разработанная методика формирования топологии расположения штрихов дифракционной решетки позволяет получить ранее недостижимую возможность работы в

высоких (третьем и четвертом) дифракционных порядках. Применение таких решеток в спектральных приборах позволяет существенно улучшить их разрешающую способность.

3. Разработанный лабораторный макет системы бесконтактного контроля использован при проведении лабораторных работ по дисциплине «Оптическая обработка информации», «Основы оптики», «Основы квантовой электроники» для изучения оптических спектров различных источников излучения. Полученные результаты теоретических исследований используются при выполнении курсового проекта по дисциплине «Основы оптики» на кафедре №23 «Конструирования и технологий электронных и лазерных средств» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Результаты теоретических исследований включены в материалы курса лекций по дисциплинам «Основы оптики», «Когерентная оптика». Использование полученных научных результатов в учебном процессе подтверждено актом о внедрении.

4. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований послужили основой выполнения НИР «Исследование и разработка нового поколения устройств спектрально-корреляционного анализа сигналов оптического диапазона для экстремальных условий эксплуатации» в рамках выполнения государственных заданий высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности, проект № 8.9203.2017/8.9 (2017-2019). Результатом этого проекта должны явиться действующие экспериментальные образцы устройств анализа спектров сигналов оптического диапазона.

5. Научные исследования, выполненные в рамках данной диссертационной работы, являются составной частью поддержанных грантами РФФИ продолжающихся НИР № 17-07-00826, № 17-07-00554, № 16-07-00549 и завершенных НИР №13-07-00238, №15-37-20446. Использование полученных научных результатов при выполнении НИР подтверждено актом о внедрении.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель спектрального преобразования и детектирования, реализованных в оптическом спектральном приборе с дифракционной решеткой.

2. Способ повышения разрешающей способности спектрального прибора путем применения дифракционной решетки с периодическим неэквидистантным расположением штрихов разной ширины, позволяющей работать в высоких дифракционных порядках.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований искажений и энергетических потерь в ВОСП и их влияние на результаты измерений спектральным прибором с дифракционной решеткой.

4. Результаты лабораторных экспериментальных исследований по бесконтактному измерению оптических спектров тестовых источников спектральным прибором с улучшенной разрешающей способностью.

Апробация работы:

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах в период с 2014 по 2018 гг.:

- Научная сессия ГУАП, 2015, 2018 гг., г. Санкт-Петербург, Россия.
- Международная молодежная научная конференция «Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах», 2014-2018 гг., ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия.
- Международная конференция «Оптика-2015», Университет ИТМО, 2015 г., г. Санкт-Петербург, Россия.
- Международная конференция «Saint-Petersburg OPEN 2018 по Оптоэлектронике, Фотонике, Нано- и Нанобиотехнологиям», 2018 г., г. Санкт-Петербург, Россия.

- Международная конференция «SPIE Optics and Photonics», 2015 – 2017 гг., г. Сан-Диего, Калифорния, США.
- Международная конференция «SPIE Photonics Europe-2016», 2016 г., г. Брюссель, Бельгия.
- Международная конференция «OSA Frontiers in Optics», 2016 г., г. Рочестер, Нью-Йорк, США.
- Международная конференция «SPIE Photonics Europe-2018», 2018 г., г. Страсбург, Франция.

Публикации. Материалы, отражающие основное содержание и результаты диссертационной работы, опубликованы в 25 печатных работах. Из них 1 – патент РФ, 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 10 – в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, а также 10 работ опубликованы в материалах российских и международных научных конференций, входящих в РИНЦ.

Личный вклад автора. Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении методов их решения, получении и анализе результатов исследований.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка используемой литературы, двух приложений. Общий объем – 150 страниц, включая 68 рисунков и 4 таблицы. Список используемой литературы содержит 129 наименований.

Область исследования соответствует положениям 1, 2, 3, 6, 7 специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Основное содержание работы

Введение

Во введении обозначена актуальность темы диссертационного исследования, указаны цель и задачи, объект и предмет исследования, практическая значимость и научная новизна работы, положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы и ее структуре.

В **первом разделе** показана выдающаяся роль спектральных измерений в оптическом диапазоне и их важность при решении задач контроля различных процессов и объектов. Рассматриваются два метода оптического спектрального контроля по способу проведения измерений: контактный и бесконтактный метод. Рассмотрен ряд проблем, с которыми сталкивается исследователь, при использовании того или другого способа измерений.

При контактном методе анализируемое излучение падает непосредственно на входную апертуру спектрального прибора. При выполнении спектральных измерений контактным методом в неблагоприятных условиях (высокой температуры, вибраций и т.д.) теряется часть спектроскопической информации вследствие воздействия неблагоприятных условий на спектральный прибор.

Для нейтрализации негативных воздействий на спектральный прибор предлагается использование бесконтактного метода, когда излучение от контролируемого процесса или объекта передается на безопасное для спектрального прибора расстояние по ВОСП. В этом случае возникает ряд других проблем, связанных с искажениями и энергетическими потерями оптического сигнала в ВОСП.

Рассмотрены некоторые области применения методов оптической спектроскопии в задачах контроля: контроль состава выплавляемых стали, тугоплавких металлов и сплавов, контроль процессов горения, контроль производства лекарственных форм и сырья, контроль нефтепродуктов в нефтехимии.

Приводится обзор оптических спектральных приборов, предлагается их классификация по принципу действия и регистрации спектрометрической информации, рассмотрен принцип действия каждого из них и выполнено сопоставление по их основным характеристикам.

В качестве рассматриваемых приборов выступают: спектральные приборы с призмой и дифракционной решеткой, прибор на базе акустооптического перестраиваемого фильтра, Фурье-спектрометр и многоканальный оптический спектрометр.

Сопоставление приборов выполнено по следующим параметрам и характеристикам: разрешающая способность, анализируемый диапазон частот (длин волн), влияние передачи излучения по волокну на разрешающую способность, время измерения спектра, динамический диапазон, быстродействие и массогабаритные характеристики.

На основании выполненного сопоставления оптических спектральных приборов, а также с учетом специфики рассмотренных областей применения оптической спектроскопии, делается вывод о целесообразности применения спектрального прибора с дифракционной решеткой для задач контроля и необходимости улучшения основной метрологической характеристики прибора – его разрешающей способности.

Во **втором разделе** отмечается необходимость разработки более совершенной теоретической базы спектрального прибора с дифракционной решеткой, без которой невозможно улучшение его характеристик.

Приводится аргументированная критика современного состояния теории оптической спектрометрии вообще, и спектрального прибора с дифракционной решеткой в частности, которая имеет ряд недостатков. Недостатки заключаются в следующем:

- Отсутствует теоретический анализ преобразования оптического сигнала от входной апертуры спектрального прибора с дифракционной решеткой до результата спектральных измерений.
- Отсутствует связь между математической теорией гармонического анализа и результатами спектральных измерений спектральным прибором с дифракционной решеткой.
- Отсутствует динамика взаимодействия анализируемого сигнала и спектрального прибора.
- Аппаратная функция спектрального прибора устанавливается в рамках эвристических рассуждений вне связи с общей теорией линейных систем.

В связи с этим предлагается новая модель спектрального преобразования и детектирования в спектральном приборе с дифракционной решеткой, которая базируется на последовательном описании распространения и преобразования оптического сигнала от входной апертуры до результата считывания спектрометрической информации. В этом случае оптическая схема прибора (рисунок 1а) может быть представлена в виде функциональной схемы (рисунок 1б).

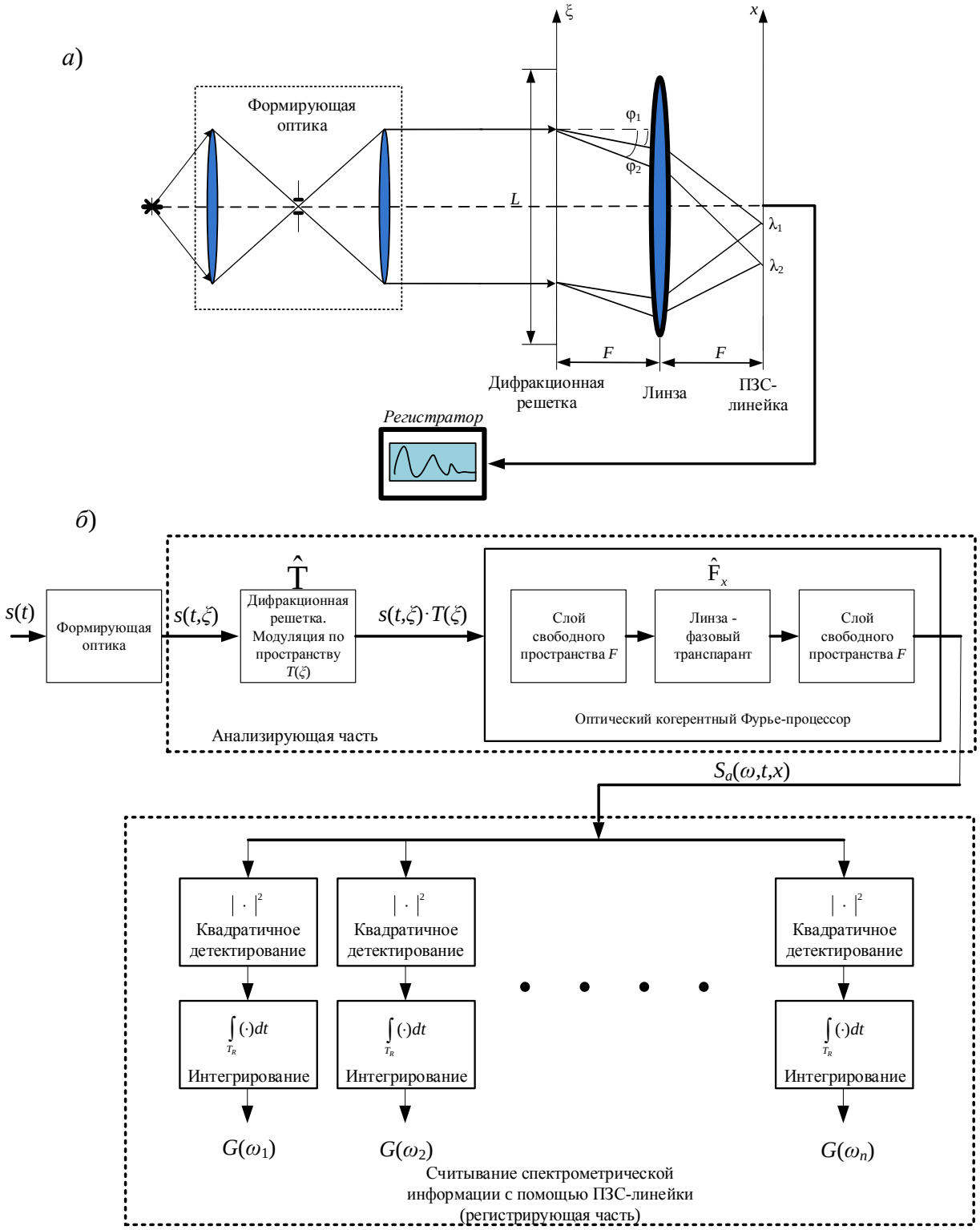


Рисунок 1 – Оптическая и функциональная схема прибора

Прибор рассматривается как совокупность анализирующей и регистрирующей частей.

Анализирующая часть прибора, представляющая собой оптический когерентный Фурье-процессор с помещенной на его входе дифракционной решеткой, является линейной системой.

Согласно общей теории линейных систем, исчерпывающей характеристикой любой линейной системы является ее аппаратная функция, которая является ядром линейного интегрального оператора:

$$y(\xi) = \hat{\mathrm{L}}x(\xi) = \int_{\Xi} K(\xi,\xi') \cdot x(\xi')\mathrm{d}\xi', \tag{1}$$

где $K(\xi,\xi')$ – аппаратная функция линейной системы, $x(\xi)$, $y(\xi)$ – вход и выход системы соответственно.

Аппаратная функция может быть определена как результат преобразования линейной системой (оператор $\hat{\mathrm{L}}$) соответствующего дельта-воздействия:

$$K(\xi,\ \xi') = \hat{\mathrm{L}}\delta(\xi - \xi'). \tag{2}$$

Для дифракционного спектрального прибора комплексная аппаратная функция может быть записана как результат преобразования (2) для дельта-функции частоты:

$$K(\omega,\omega') = \hat{\mathrm{L}}[\delta(\omega - \omega')] = \hat{\mathrm{F}}_x \hat{\mathrm{T}}\hat{\mathrm{V}}\hat{\mathrm{F}}^{-1}[\delta(\omega - \omega')], \tag{3}$$

где операторы $\hat{\mathrm{F}}^{-1}$ и $\hat{\mathrm{V}}$ позволяют получить входное воздействие на прибор в виде однородной плоской монохроматической волны:

$$s(t,z) = \dot{E}\exp(i(\omega' t - kz)) = \dot{E}\exp(i\omega'(t - z/c)), \tag{4}$$

где $\dot{E}$ и ω' – комплексная амплитуда и круговая частота волны, c – скорость света, z – пространственная координата вдоль распространения волны.

Дальнейшее получение аппаратной функции прибора включает разложение функции пропускания дифракционной решетки в ряд Фурье на ее апертуре L и преобразование оптического поля, прошедшего дифракционную решетку (оператор $\hat{\mathrm{T}}$), оптическим когерентным Фурье-процессором (оператор $\hat{\mathrm{F}}_x$).

Функция пропускания дифракционной решетки $T(\xi)$, работающей в проходящем свете, которая представляет собой совокупность чередующихся прозрачных и непрозрачных полос, может быть представлена в виде комплексного ряда Фурье:

$$T(\xi) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} C_n \exp(in\Omega_g \xi), \tag{5}$$

где коэффициенты разложения Cn равны:

$$C_n = 4\frac{\sin(n\Omega_g \frac{\tau_g}{2})}{n\Omega_g} \cdot \frac{\sin[(N + \frac{1}{2})n\Omega_g T_g]}{L \cdot \sin\left(n\Omega_g \frac{T_g}{2}\right)}, \tag{6}$$

где N – число элементов прозрачности в апертуре дифракционной решетки, Tg – период решетки, τ_g – ширина элемента прозрачности, $\Omega_g = 2\pi / T_g$.

С учетом операции пространственного преобразования Фурье установлена комплексная аппаратная функция в виде:

$$K(\omega,\omega',t) = \dot{E}\exp(i\omega'[t - z/c]) \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2C_k \frac{\sin[(\omega(x) - \omega')T_a(x)/2]}{(\omega(x) - \omega')x / c_0 F}, \tag{7}$$

где $\omega(x) = (k\Omega_g cF / x)$, $T_a(x) = Lx / 2cF$, k – номер дифракционного порядка.

На основании полученного выражения (7) установлены **важнейшие свойства спектров** в различных дифракционных порядках:

- нелинейное изменение ширины аппаратной функции, а значит, и разрешающей способности прибора в пределах каждого дифракционного порядка;
- нелинейное изменение спектральной частоты вдоль пространственной координаты в пределах каждого дифракционного порядка;
- улучшение разрешающей способности прибора с увеличением номера дифракционного порядка;
- уменьшение интенсивности дифрагированного света в высокие порядки в силу убывания коэффициентов разложения функции пропускания дифракционной решетки в ряд Фурье. По этой причине на практике используются дифракционные порядки не выше ±2-го.

Отмечается, что успешным измерениям спектров в высоких дифракционных порядках препятствует уменьшение интенсивности дифрагированного в них света.

Процедура считывания спектрометрической информации (регистрирующая часть) рассматривается как операция частотной фильтрации каждым элементом ПЗС-линейки (пикселем) сформированного комплексного мгновенного спектра в задней фокальной плоскости линзы. При этом дальнейшая операция фотодетектирования каждым пикселем рассматривается на основе модели, представленной на рисунке 2.

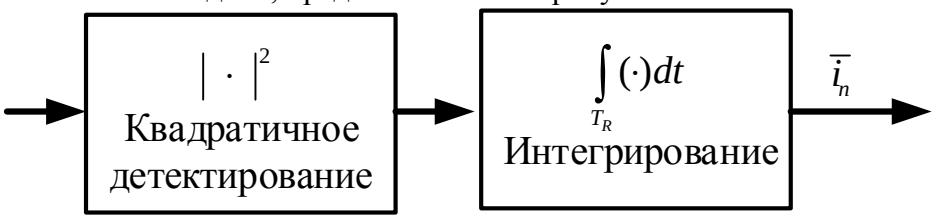


Рисунок 2 – Модель операции фотодетектирования пикселем ПЗС-линейки

Показано, что каждый элемент xn осуществляет считывание спектра в полосе частот:

$$\Delta\omega_n = \frac{4\pi cF\Delta x_n}{kT_g x_n^2}, \tag{8}$$

определяемую параметрами оптических элементов прибора, а также размером пикселя ПЗС-линейки Δx_n.

Преобразование комплексного мгновенного спектра в результате операции фотодетектирования позволяет записать выражение для усреднённого фототока n-го пикселя в виде:

$$\bar{i}_n = B\int_{\omega_n-\Delta\omega_n}^{\omega_n+\Delta\omega_n} \frac{\sin^2[(\omega(x)-\omega')\frac{T_a}{2}]}{\left[(\omega(x)-\omega')\frac{T_a}{2}\right]^2} G(\omega')d\omega' = B\int_{\omega_n-\Delta\omega_n}^{\omega_n+\Delta\omega_n} \mathrm{sinc}^2(\cdot)\cdot G(\omega')d\omega', \tag{9}$$

где B – коэффициент пропорциональности, учитывающий интенсивность в соответствующем дифракционном порядке, квантовую эффективность фотодетектора, время интегрирования и т.д., $G(\omega')$ – математический энергетический (истинный) спектр анализируемого оптического сигнала.

При этом окончательная связь вход-выход прибора от его входной апертуры до результата считывания спектрометрической информации может быть представлена в матричном виде:

$$\|G(\omega_n)\| = B \int_{\omega_n-\Delta\omega_n}^{\omega_n+\Delta\omega_n} diag\{A_n(\omega,\omega')\} \cdot \|G(\omega')\| d\omega' \quad , \qquad (10)$$

где $diag\{A_n(\omega,\omega')\}$ – энергетическая аппаратная функция спектрального прибора с дифракционной решеткой в матричной форме, $A_n(\omega,\omega') = \mathrm{sinc}^2(\cdot)$.

Аппаратная функция для энергетического спектра дается диагональной матрицей, где каждый элемент отвечает за результат измерения отдельным элементом ПЗС-линейки.

Таким образом, на базе последовательного рассмотрения преобразования сигнала от входной апертуры прибора до результата считывания спектрометрической информации была получена энергетическая аппаратная функция прибора, являющаяся его исчерпывающей характеристикой. Следовательно, решена основная задача теории спектральных измерений для спектрального прибора – установлена связь между физическим и математическим спектром.

В **третьем разделе** рассматривается влияние передачи анализируемых сигналов по ВОСП на результат спектральных измерений спектральным прибором с дифракционной решеткой. Предложена система контроля с ВОСП на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой, которая представлена на рисунке 3.

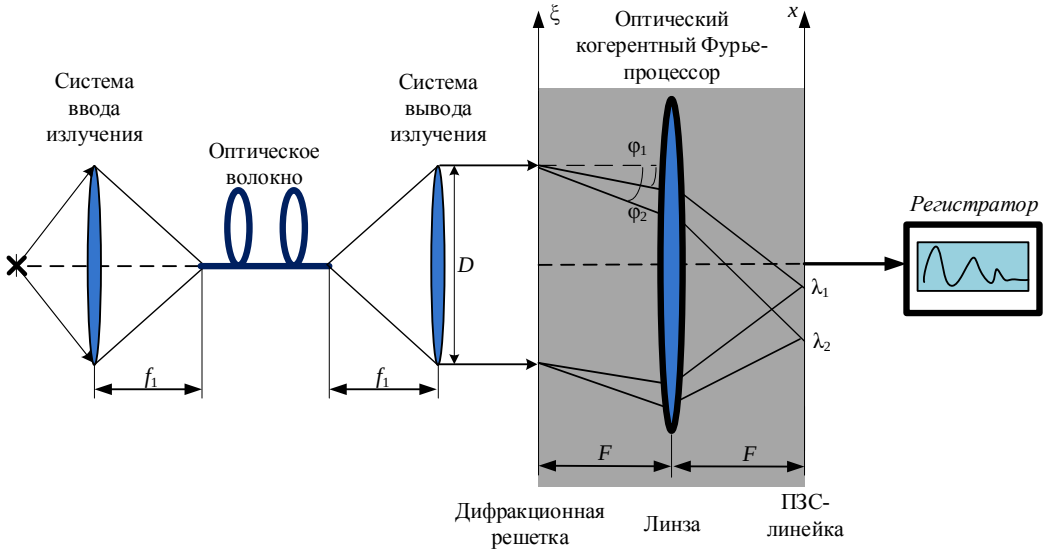
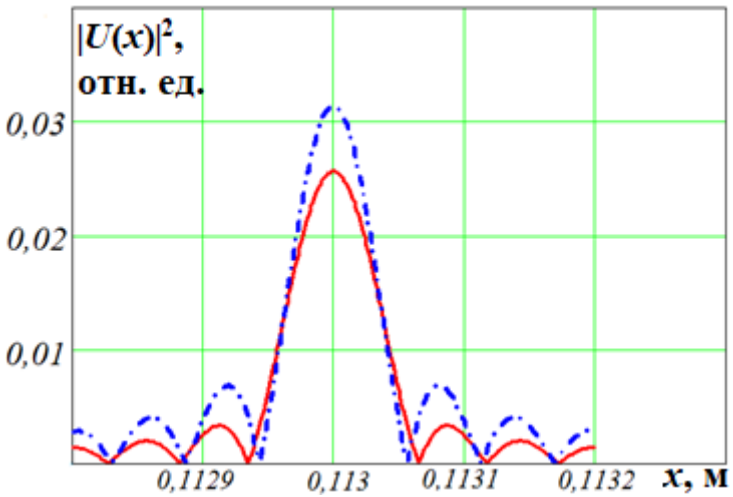


Рисунок 3 – Система бесконтактного измерения спектров на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой

Степень влияния ВОСП на аппаратную функцию прибора рассматривается в рамках следующей модели. Поле на торце одномодового волокна описывается в виде усеченного гауссова распределения, а система вывода излучения из волокна, состоящая из фокусирующей линзы, окруженной двумя слоями свободного пространства, рассматривается как оптический когерентный Фурье-процессор, расположенный перед дифракционной решеткой. Дальнейшее преобразование полученного результата анализирующей системой спектрального прибора с дифракционной решеткой позволяет оценить уширение аппаратной функции. Результаты компьютерного моделирования квадрата модуля аппаратной функции (АФ) прибора для +1 дифракционного порядка показаны на рисунке 4.



Штриховая линия – АФ без волокна, Сплошная линия – АФ с применением волоконно-оптической системы передачи

Рисунок 4 – Результаты компьютерного моделирования АФ спектрального прибора с дифракционной решеткой

Результаты компьютерного моделирования показывают уширение аппаратной функции в 1,2 раза при использовании одномодового волокна.

Экспериментальные измерения показали уширение аппаратной функции в 1,5 раза.

Энергетические потери в системе вывода излучения из ВОСП, рассматриваются на основе модели, учитывающей дифракционные потери, вызванные распространением части оптического излучения вне апертуры линзы. Приводится оценка величины этих потерь в зависимости от различных параметров: длины волны оптического излучения (λ), расстояния от торца волокна до линзы (f1), и размера апертуры линзы (D). Разработана программа в системе MatLab для расчета энергетических потерь и выбора оптимальных параметров оптических элементов системы вывода излучения из ВОСП для минимизации потерь. Приведены результаты теоретического расчета и эксперимента по установлению энергетических потерь.

В **четвертом разделе** предложен способ повышения разрешающей способности прибора, который заключается в использовании высокопорядковой дифракционной решетки с особой топологией, что позволяет перераспределить энергию из нулевого, первого и второго дифракционных порядков – в высшие. Для такой топологии коэффициенты разложения в функции прозрачности (5) при n = 3, 4 оказываются больше, чем при n = 1, 2.

На рисунке 5 представлена топология дифракционной решетки (а) и расчет коэффициентов разложения ряда Фурье ее функции прозрачности (б).

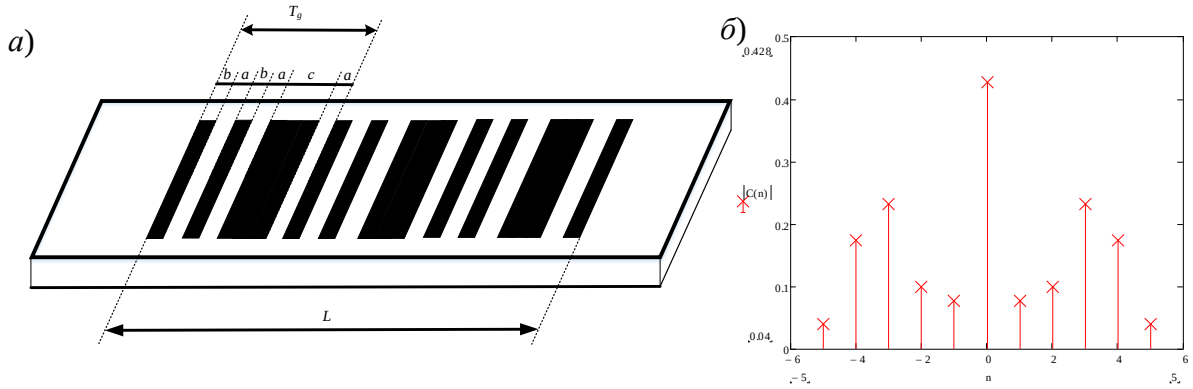


Рисунок 5 – Высокопорядковая дифракционная решетка (*а*) и коэффициенты разложения ряда Фурье (*б*)

Для экспериментального подтверждения предложенного способа повышения разрешающей способности и практического применения спектрального прибора с дифракционной решеткой и ВОСП в задачах контроля разработан лабораторный макет системы бесконтактного контроля, фотография которого приведена на рисунке 6.

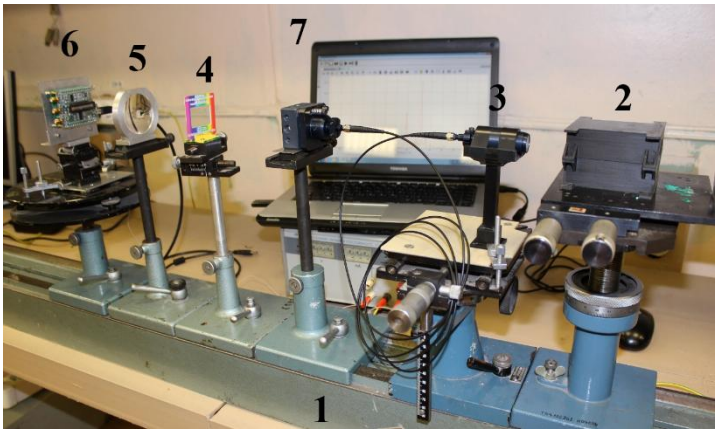


Рисунок 6 – Лабораторный макет системы бесконтактного контроля на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой

На рисунке 6 обозначены:

1. Оптическая скамья ОСК-2;
2. Блок оптических аттенюаторов;
3. ВОСП;
4. Дифракционная решетка;
5. Линза;
6. Приемно-регистрирующее устройство на базе ПЗС-линейки;
7. Персональный компьютер.

Для демонстрации улучшения разрешающей способности прибора был выполнен эксперимент по измерению двух близко расположенных спектров лазерных источников (лазеры с длинами волн 632 и 650 нм) в –1, –2, –3 и –4 дифракционных порядках. Результаты этого эксперимента приведены на рисунке 7.

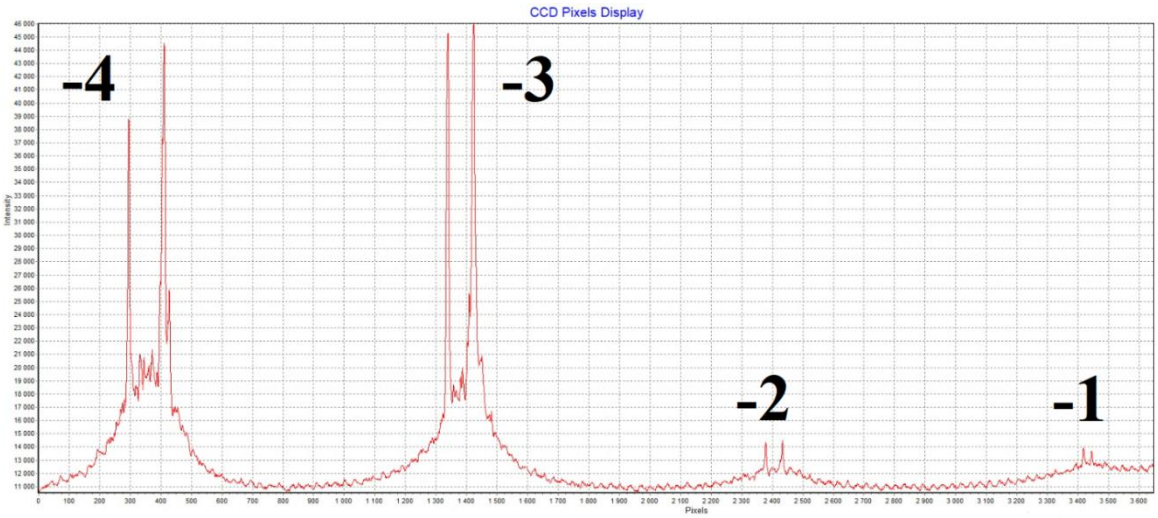


Рисунок 7 – Результаты измерения спектра

Из рисунка 7 видно, что с увеличением номера дифракционного порядка спектры лазерных источников сильнее разнесены по пространству (в масштабе ПЗС-линейки), что

свидетельствует о повышении разрешающей способности прибора с увеличением номера дифракционного порядка. Кроме того, интенсивность дифрагированного света в –3 и –4 дифракционный порядок оказалась больше, чем в –1 и –2. Успешное измерение оптических спектров в 3 или 4 дифракционном порядке позволяет повысить разрешающую способность прибора пропорционально номеру дифракционного порядка. Показано, применение в спектральном приборе высокопорядковой решётки по сравнению с обычной позволяет улучшить спектральное разрешение на 15%. Отмечается, что в случае реализации решетки с подавлением нежелательных дифракционных порядков, спектральное разрешение может быть увеличено до 2-3 раз.

Установлена необходимость коррекции результатов спектральных измерений в силу отмеченных во втором разделе свойств спектров – нелинейности изменения частотной шкалы вдоль пространственной координаты, а также неравномерности спектральной чувствительности ПЗС-линейки по диапазону анализируемых частот и неравномерности характеристики затухания оптического волокна. Предложенная процедура коррекции выглядит следующим образом:

1. Преобразование пространственной шкалы в необходимую шкалу длин волн или частот в соответствии с выражением для ω(x).

2. Коррекция неравномерности чувствительности ПЗС-линейки и характеристики затухания волокна путем перемножения массива значений результата считывания ПЗС-линейкой на значения ее чувствительности и частотной характеристики волокна.

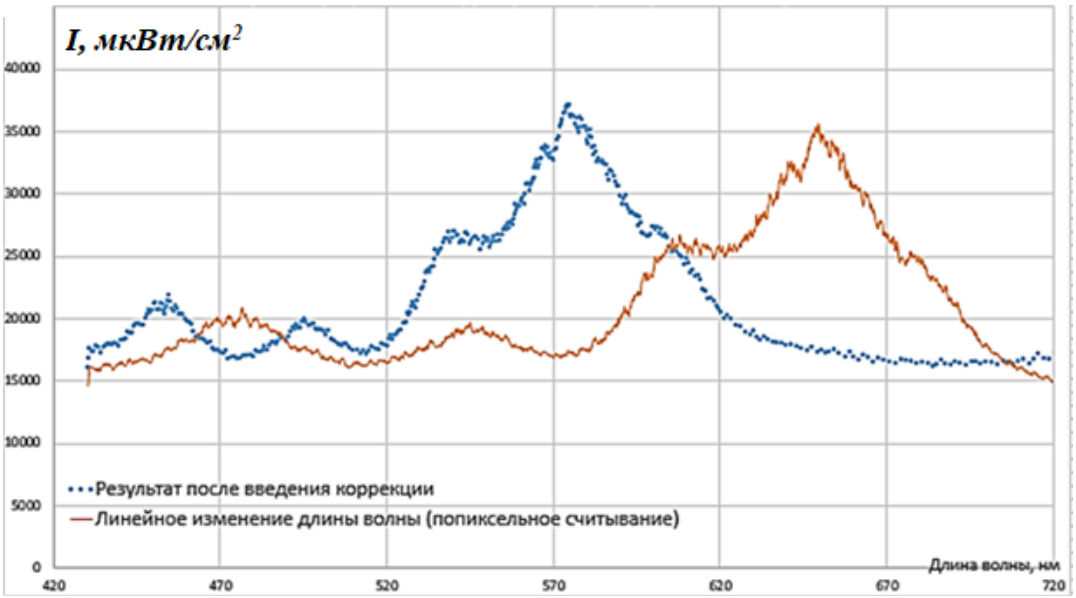


Рисунок 8 – Результат коррекции спектральных измерений

Рисунок 8 отражает результат непосредственного измерения спектра и после введения коррекции для лампы HL-3P-CAL фирмы Ocean Optics.

Приложение А. Приведено объяснение появления «духов» – ложных спектральных линий в спектральном приборе с дифракционной решеткой с использованием разработанной математической модели спектрального преобразования в этом приборе.

Приложение Б. Приведены результаты экспериментальных исследований по измерению эмиссионных спектров меди и поваренной соли, возбужденных пламенем высокотемпературной горелки, с помощью разработанной системы бесконтактного оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой.

Приложение В. Представлены скан-копии актов о внедрении.

Заключение

1. Применение спектрального прибора с дифракционной решеткой в рассмотренных задачах оптического спектрального контроля требует улучшения основной его метрологической характеристики – разрешающей способности.

2. Анализ современного состояния теории спектральных измерений в оптическом диапазоне вообще, и спектрального прибора с дифракционной решеткой в частности, показал необходимость разработки целого ряда теоретических вопросов, призванных устранить недостатки существующей теоретической базы и указать пути дальнейшего развития и совершенствования спектрального прибора с дифракционной решеткой. Такая постановка вопроса потребовала разработки новой математической модели спектрального преобразования, реализуемого в спектральном приборе с дифракционной решеткой, которая базируется на последовательном рассмотрении преобразования оптического сигнала от входной апертуры до результата считывания спектрометрической информации.

3. В рамках разработанной математической модели установлены комплексная и энергетическая аппаратные функции спектрального прибора с дифракционной решеткой, являющиеся его исчерпывающими характеристиками.

4. Разработанная математическая модель позволила установить важнейшие свойства спектров в различных дифракционных порядках и, тем самым, был определен путь улучшения основной метрологической характеристики системы контроля – разрешающей способности путем изменения топологии дифракционной решетки и работы в высоких дифракционных порядках.

5. Предложена методика формирования топологии расположения штрихов дифракционной решетки, позволяющая успешно выполнять спектральные измерения в третьем и четвертом дифракционных порядках, где разрешающая способность системы контроля значительно лучше.

6. Предложена математическая модель, учитывающая влияние ВОСП на аппаратную функцию спектрального прибора с дифракционной решеткой и позволяющая минимизировать энергетические потери в этой системе.

7. Предложена процедура коррекции результатов спектроскопических измерений спектральным прибором с дифракционной решеткой, учитывающая нелинейную связь пространственной и частотной координат, а также неравномерность спектральной чувствительности ПЗС-линейки и частотной характеристики оптического волокна.

8. Разработан лабораторный макет системы контроля на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой, ВОСП и приемно-регистрирующим устройством на базе ПЗС-линейки, позволяющим выдавать результаты спектроскопических измерений на дисплей, и выполнены экспериментальные исследования по измерению спектров тестовых источников этой системой.

9. Доказано улучшение разрешающей способности системы контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой на 15% по сравнению с использованием обычной дифракционной решетки.

10. На основании рассмотрения процедуры считывания спектрометрической информации в системе контроля с помощью ПЗС-линейки на базе модели: «пространственная частотная фильтрация каждым элементом (пикселем) – квадратичное детектирование – интегрирование по времени» показано, что результат считывания энергетического спектра дается в форме его отсчетных значений.

11. Корректность предложенных теоретических и компьютерных моделей подтверждена экспериментально.

12. Практическая значимость выполненных в рамках диссертационной работы исследований заключается в улучшении разрешающей способности системы контроля и

возможности выполнения процедуры контроля в неблагоприятных условиях и в режиме реального времени, а также в возможности автоматизации технологических процессов на основе разработанной системы контроля.

13. Дальнейшее повышение разрешающей способности системы контроля связывается с поиском более совершенной топологии дифракционной решетки с учетом технологических возможностей ее изготовления, позволяющей подавить дифракцию света в низкие и более эффективно использовать высокие дифракционные порядки.

Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Казаков, В.И. Системный подход в теории спектральных измерений / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, О.Д. Москалец // Датчики и системы. 2016. №1. С.10-15.

2. Казаков, В.И. Комплексные спектры в дифракционном решеточном спектральном приборе / В.И. Казаков, О.Д. Москалец // Радиопромышленность. 2016. №4. С. 32-37.

3. Ваганов, М.А. Методы теории случайных процессов в задачах спектральных измерений / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, С.В. Кулаков, О.Д. Москалец // Радиотехника. 2017. №5. С. 67-72.

4. Казаков, В.И. Измерение оптических спектров решеточным спектральным прибором в высших дифракционных порядках / В.И. Казаков, О.Д. Москалец // Датчики и системы. 2018. №12. С. 22-27.

Патенты

5. Пат. 181375 РФ, МПК8 G01J 3/18, G01J 3/24, G02B 5/18. Дифракционный решеточный спектральный прибор / В. И. Казаков, О. Д. Москалец, А. С. Параскун (РФ); заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. № 2018106621; заявл. 21.02.2018; опубл. 11.07.2018 // Бюл. № 20. 2с.

Статьи в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science

6. Kazakov, V.I. Influence of aperture lens system on optical information processing / V.I. Kazakov, S.N. Mosentsov, O.D. Moskaletz // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9598. P. 959809.

7. Kazakov, V.I. Alternative theory of diffraction grating spectral device and its application for calculation of convolution and correlation of optical pulse signals / V.I. Kazakov, D.O. Moskaletz, O.D. Moskaletz // Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9889. P. 988924.

8. Kazakov, V.I. Optical wave beam propagation in two-lens scheme with arbitrary parameters / V.I. Kazakov // Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9889. P. 98891C.

9. Kazakov, V.I. Diffraction at the grating and appearance of “spirits” from the view of radiooptics / V.I. Kazakov, N.Yu. Fironova, O.D. Moskaletz // OSA Technical Digest (online). 2016. P. JW4A.69.

10. Vaganov, M.A. A system approach in the theory of optical spectral measurements / M. A. Vaganov, V. I. Kazakov, O. D. Moskaletz // Automation and Remote Control. 2017. Vol. 78. Issue 6. P. 1144-1150.

11. Kazakov, V.I. Influence of analyzed signals fiber-optic transmission system on spread function of the diffraction grating spectral device / V.I. Kazakov, O.D. Moskaletz, A.S. Paraskun, A.Y. Zhdanov // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10395. P. 1039514.

12. Kazakov, V.I. Transformation of a harmonized random process by spectral devices that perform instantaneous spectrum analysis / V.I. Kazakov, D.O. Moskaletz, O.D. Moskaletz,

M.A. Vaganov // Proc. of SPIE. 2018. Vol. 10680. P. 1068024.

13. Belekhov, I.A. Analysis of the spectrum of optical pulses: time-dispersion and diffraction methods / I.A. Belekhov, I.S. Izhboldin, V.I. Kazakov, A.S. Kuryleva, O.D Moskaletz // Proc. of SPIE. 2018. Vol.10680. P.1068026.

14. Kazakov, V.I. Instantaneous spectra in spectral and correlation processing of dynamic signal devices of radio and optical ranges and their linear and nonlinear transformations / V.I. Kazakov, A.S. Kuryleva, D.O. Moskaletz, O.D. Moskaletz // Proc. of SPIE. 2018. Vol. 10680. P. 1068025.

15. Kazakov, V. Comparison of optical spectral devices in the framework of system approach // V. Kazakov, O. Moskaletz, M. Vaganov // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1124. P. 051019.

Публикации в прочих изданиях

16. Казаков, В.И. Применение системного подхода к анализу двухлинзовой оптической схемы / В.И. Казаков, О.Д. Москалец // НАУЧНАЯ СЕССИЯ ГУАП. Сборник докладов: в 3 частях / Под общей редакцией Ю.А. Антохиной. – Часть II. Технические науки. СПб.: ГУАП. 2015. С. 74-79.

17. Kazakov, V.I. Calculation of diffraction losses in the system «optical fiber - lens» / V.I. Kazakov // Известия кафедры UNESCO «Дистанционное инженерное образование» ГУАП. Сборник статей. СПб.: ГУАП. 2016. С. 40-42.

18. Kazakov, V.I. Diffraction on the grating from the view of radiooptics / V.I. Kazakov, O.D. Moskaletz // XIX International conference for young researchers «Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems»: Preliminary program and abstracts. 2016. P. 53-56.

19. Kazakov, V.I. Spectral measurements by diffraction grating device with fiber-optics system of signal transmission. / V.I. Kazakov, A.S. Paraskun // XX International Conference for Young Researchers. Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems: Scientific papers. 26-30 June, 2017, Saint-Petersburg / Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg. 2017. P. 180-184.

20. Kazakov, V.I. Complex spectra in a diffraction lattice spectral device / V.I. Kazakov, O.D. Moskaletz, M.A. Fadeev // XX International Conference for Young Researchers. Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems: Scientific papers. 26-30 June, 2017, Saint-Petersburg / Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg. 2017. P. 215-219.

21. Kazakov, V.I. Power spectrum estimation of optical radiation by using CCD-structure / V.I. Kazakov, A.S. Kuryleva, O.D. Moskaletz, A.S. Paraskun // XX International Conference for Young Researchers. Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems: Scientific papers. 26-30 June, 2017, Saint-Petersburg / Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg. 2017. P. 220-224.

22. Kazakov, V.I. Experimental investigation of the optical fiber influence to spread function of the grating spectral device / V.I. Kazakov, A.S. Paraskun // Bulletin of the UNESCO department «Distance education in engineering» of the SUAI: Collection of the papers. St. Petersburg. 2017. Issue 2. P. 54-57.

23. Казаков, В.И. Решеточный спектральный прибор с возможностью работы в высших дифракционных порядках / В.И. Казаков, А.С. Параскун // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах: Двадцать первая международная молодежная конференция ГУАП: сб. статей. СПб: ГУАП. 2018. С. 165-171.

24. Ваганов, М.А. Считывание, обработка и коррекция спектрометрической информации в дифракционном решеточном спектральном приборе / М.А. Ваганов, В.И.

Казаков, А.С. Параскун // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах: Двадцать первая международная молодежная конференция ГУАП: сб. статей. СПб: ГУАП. 2018. С. 172-178.

25. Ваганов, М.А. Экспериментальные исследования высокотемпературных процессов горения и их спектроскопические измерения / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, А.С. Параскун // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах: Двадцать первая международная молодежная конференция ГУАП: сб. статей. СПб: ГУАП. 2018. С. 179-184.