

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.233.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ», МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 01 октября 2019 г. № 8/19

О присуждении Казакову Василию Ивановичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Система оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой» по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» принята к защите 27 июня 2019 г., протокол № 6/19, диссертационным советом Д 212.233.01 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, приказ № 421/нк от 12.08.2013 г.

Соискатель Казаков Василий Иванович, 1991 года рождения, в 2014 году окончил ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», диплом № 107814 0000049, в период с 2014 по 2018 год был аспирантом Федерального государственного автономного образовательного учреждения

высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», работает в должности старшего преподавателя Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Диссертация выполнена на кафедре конструирования и технологий электронных и лазерных средств Федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Москалец Олег Дмитриевич, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, доцент.

Официальные оппоненты:

- 1) Рудинский Александр Вадимович, доктор технических наук, начальник бюро технических исследований закрытого акционерного общества «Научно-производственный центр «Аквамарин» (г. Санкт-Петербург);
- 2) Гаврилов Геннадий Андреевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптоэлектроники и голографии федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург), старший научный сотрудник;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Вектор» (г. Санкт-Петербург), в своем положительном заключении, утвержденном генеральным директором С.В. Скорых, подготовленным начальником научно-технического центра

НТЦ-5 В.В. Куценко, главным научным сотрудником, д.т.н., с.н.с. А.М. Кирюхиным, и ведущим научным сотрудником, к.т.н., с.н.с. В.И. Мининым, указала, что диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную работу на актуальную тему, обладает новизной и практической значимостью, содержит комплексное научно-техническое решение разработки системы оптического спектрального контроля для экстремальных условий эксплуатации с улучшенной разрешающей способностью и соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям.

Соискатель имеет 25 опубликованных работ по теме диссертации, включая патент на полезную модель, из них в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК опубликовано 4 работы. Общий объем: 8 п.л. (4,2 п.л. соискателя). 10 работ опубликовано соискателем в научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

Наиболее значимыми из опубликованных работ автора являются:

1. **Статья «Кзаков, В.И. Системный подход в теории спектральных измерений / М.А. Ваганов, В.И. Кзаков, О.Д. Москалец // Датчики и системы. 2016. №1. С.10-15» (объем 0,3 п.л. / авторский вклад 0,1 п.л.).**

Личный вклад: выполнены операторное описание преобразований оптического сигнала в спектральном приборе с дифракционной решеткой и установлена методика определения аппаратной функции прибора, сформулированы выводы.

2. **Статья «Кзаков, В.И. Комплексные спектры в дифракционном решеточном спектральном приборе / В.И. Кзаков, О.Д. Москалец // Радиопромышленность. 2016. №4. С. 32-37», (объем 0,4 п.л. / авторский вклад 0,2 п.л.)**

Личный вклад: установлена функция пропускания дифракционной решетки в форме разложения в комплексный ряд Фурье, получены

коэффициенты разложения этого ряда, выполнено компьютерное моделирование, сформулированы выводы.

3. Статья **«Кзаков, В.И. Методы теории случайных процессов в задачах спектральных измерений / М.А. Ваганов, В.И. Кзаков, С.В. Кулаков, О.Д. Москалец // Радиотехника. 2017. №5. С. 67-72»**, (объем 0,6 п.л. / авторский вклад 0,15 п.л.).

Личный вклад: описано получение оценки энергетического спектра на базе применения функций с двойной ортогональностью.

4. Статья **«Кзаков, В.И. Измерение оптических спектров решеточным спектральным прибором в высших дифракционных порядках / В.И. Кзаков, О.Д. Москалец // Датчики и системы. 2018. №12. С. 22-27»**, (объем 0,4 п.л. / авторский вклад 0,2 п.л.).

Личный вклад: выполнены разработка топологии дифракционной решетки, компьютерное моделирование результатов, постановка экспериментов, обработка и интерпретация результатов.

5. Статья **«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»** (объем 0,8 п.л. / авторский вклад 0,2 п.л.).

Личный вклад: предложена методика оценки уширения аппаратной функции прибора при передаче сигнала по одномодовому волокну.

6. Статья **«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»**, (объем 0,4 п.л. / авторский вклад 0,4 п.л.).

Личный вклад: все исследования выполнены автором лично. Теоретически и экспериментально исследованы энергетические потери в системе вывода излучения из волокна. Предложена методика расчета и минимизации энергетических потерь.

7. Статья «Казаков, В.И. 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» (объем 0,3 п.л. / авторский вклад 0,1 п.л.).

Личный вклад: получен результат считывания спектра ПЗС-линейкой в форме его отсчетных значений, а также предложена методика коррекции результатов считывания.

В диссертации Казакова В.И. отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах соискателя, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Результаты диссертационной работы внедрены в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» и малом инновационном предприятии ООО «ФАНТОМ», г. Санкт-Петербург.

На диссертацию и автореферат поступили **отзывы из 13 организаций (все отзывы положительные)**:

1. АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» (подготовили ведущий научный сотрудник, к.т.н., С.А. Доберштейн и заместитель генерального директора по научной работе, к.ф.-м.н. С.В. Кривальцевич). Замечание: не рассмотрено влияние длины волоконно-оптической системы передачи на результат измерений.

2. ООО «Титаниум» (подготовил генеральный директор, к.т.н. А.Ю. Ташкинов). Замечания: 1) в автореферате говорится об улучшении спектрального разрешения системы контроля с высокопорядковой решеткой на 15% по сравнению с использованием обычной дифракционной решетки, однако не приводится доказательств и пояснений этому утверждению;

2) рисунок 8 на 15-ой странице автореферата при черно-белой печати потерял свою информативность.

3. ФГАОУ ВО «Университет ИТМО» (подготовил доцент факультета фотоники и оптоинформатики, к.т.н. В.Ф. Лебедев). Замечания: 1) результаты компьютерного моделирования уширения аппаратной функции прибора приведены для фиксированных параметров оптической системы. Следовало бы провести исследование и показать, по аналогии с энергетическими потерями, как меняется аппаратная функция при изменении параметров оптической системы: размера апертуры линзы, расстояния от линзы до торца волокна и длины волны анализируемого излучения; 2) в автореферате не приведены технические характеристики разработанного лабораторного макета системы контроля. В частности, демонстрируется улучшение разрешающей способности спектрального прибора с увеличением номера дифракционного порядка, но не оговаривается чему оно равно.

4. ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (Национальный исследовательский университет) (подготовил доцент, к.т.н. В.И. Батшев). Замечания: 1) отсутствует подробное описание методики формирования топологии высокопорядковой дифракционной решетки, а приведен лишь конечный результат расчета; 2) в автореферате встречаются не вполне корректно сформулированные утверждения относительно того, что было сделано другими исследователями в этой области ранее. Так, на стр. 8 приводятся недостатки «современного состояния оптической спектрометрии вообще и спектрального прибора с дифракционной решеткой в частности». Автор утверждает, например, что «отсутствует теоретический анализ преобразования оптического сигнала от входной апертуры... прибора до результата спектральных измерений». На мой взгляд, говорить о полном отсутствии теоретической базы для такого анализа не корректно; 3) не вполне ясен п.6 в разделе «научная новизна». То, что процедура считывания сигнала многоэлементным приемником может быть рассмотрена как операция пространственно-частотной фильтрации,

является известным фактом. А что значит фраза «... позволило установить результат считывания в форме отсчетных значений энергетического спектра», не ясно.

5. ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) (подготовили профессор кафедры радиотехнических систем (и средств обеспечения полетов), д.т.н. проф. Г.С. Нахмансон и старший преподаватель кафедры радиотехнических систем (дальней авиации), к.т.н. А.В. Васильев). Замечание: 1) нельзя согласиться с позицией 6 в перечне основных результатов, приведенных на с.5 в том, что считывание информации с помощью ПЗС матрицы, как операция пространственной частотной фильтрации, является новой.

6. ООО «Гефест» (подготовил председатель совета директоров ГК «Гефест», зав. кафедрой «Пожарная безопасность» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, д.т.н., профессор Л.Т. Танклевский). Замечания: 1) в автореферате не раскрыто сопоставление разрешающей способности обычной и «высокопорядковой» дифракционных решеток, а приводится лишь конечный результат: улучшение разрешающей способности на 15%; 2) в автореферате не приводятся результаты компьютерного моделирования по оптимизации параметров оптических элементов ВОСП для минимизации энергетических потерь. Эти результаты могли бы быть интересны специалистам, занимающимся разработкой оптических систем ввода-вывода излучения в волоконно-оптических системах.

7. ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» (подготовил профессор кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики», доцент А.П. Науменко). Замечания: 1) в автореферате не отражено применение функций с двойной ортогональностью при получении энергетического аппаратурного спектра; 2) результаты экспериментальных исследований по исследованию эмиссионных спектров горения порошка меди и поваренной соли, приведенных в приложении Б, следовало бы поместить в четвертый раздел диссертации, т.к. они наглядно демонстрируют

возможность применения разработанной системы в задачах контроля; 3) в автореферате не раскрыта методика формирования топологии дифракционной решетки, позволяющей выполнять анализ в высоких дифракционных порядках.

8. ФГБОУ ВО «ТУСУР» (подготовил профессор кафедры ТОР, д.т.н., А.В. Пуговкин). Замечания: 1) исследование уширения аппаратной функции выполнено для +1 порядка, в то время как в диссертации предлагается дифракционная решетка, которая позволяет успешно работать в +4 порядке. Отсюда возникает вопрос, является ли это уширение одинаковым для всех порядков, либо меняется? 2) автор оценил улучшение спектрального разрешения системы контроля при работе в +4 порядке. Однако, судя по рисунку 7 (стр. 14) автореферата, интенсивность дифрагированного света в +3 порядок оказалась больше, чем в +4, поэтому в +3 порядке чувствительность прибора будет выше. Поэтому не совсем понятен выбор +4 порядка для работы системы.

9. ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (подготовил доцент физического факультета, к.ф.-м.н. В.Б. Волошинов). Замечания: 1) в автореферате не обсуждается возможность использования не амплитудной, а фазовой дифракционной решетки, типа решетки Эшелля, в которой допускается применение высших порядков дифракции и достигается более высокое спектральное разрешение; 2) полученный результат – улучшение спектрального разрешения на 15% требует более подробного обсуждения. Применение не 1-го, а 3-го и 4-го порядков дифракции, в принципе, допускает получение более высокого спектрального разрешения. Поэтому требуются пояснения.

10. ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (подготовили зав. Кафедрой ТОР, профессор, д.т.н. В.Н. Ушаков, старший преподаватель кафедры ТОР С.В. Грачев). Замечания: 1) недостаточно обоснована новизна описания процедуры считывания информации с помощью ПЗС-линейки. Подобное описание содержится в статье Келлмана, Шейвера и Марри «Интегрирующие

приемники с акустооптическим разделением каналов», ТИИЭР, т.69, №1, 1981, с.108; 2) при обсуждении результатов измерения спектра (рисунок 7, с. 14) отмечается увеличение разрешения из-за увеличения расстояния между откликами. Однако это не совсем так, для данного утверждения требуется еще неизменность ширины аппаратной функции; 3) не объясняется, почему спектральное разрешение улучшилось лишь на 15% и на чем основаны ожидания увеличения разрешения в 2-3 раза.

11. ФГБУН Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН (подготовил заведующий отделом акустооптических информационных систем, д.ф.-м.н. В.Э. Пожар). Замечания: 1) не описан метод выбора «топологии» (а точнее геометрических параметров профиля дифракционной решетки), поэтому в полной мере оценить положение 2 по данным автореферата представляется затруднительным; 2) не совсем корректно характеризовать данный метод как бесконтактный, т.к. конец оптоволоконного зонда, являющегося частью прибора, все равно должен быть в контакте с объектом или в непосредственной близости от него. Правильнее было бы отнести его к методам удаленного контроля (измерения), т.к. оператор и основная (спектрометрическая) часть прибора удалены от потенциально опасного или труднодоступного объекта; 3) некоторые положения, выносимые на защиту, сформулированы неудачно – как результаты работы. В такой формулировке не выделяются их оригинальность и ценность для науки и техники. А перечисленные в диссертации элементы новизны и практическая значимость оказываются недостаточно отраженными в этих положениях.

12. ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский институт «МЭИ» (подготовил доцент кафедры диагностических информационных технологий, д.т.н. А.С. Мачихин). Замечания: 1) при рассмотрении процесса формирования сигнала и моделировании не учитываются аберрации линз, используемых для коллимирования излучения и его фокусировки на приемнике излучения. При использовании одиночной линзы (поз. 5 на рис. 6)

они могут быть весьма значительны и пространственно не инвариантны, что приведет к смещениям и деформации спектральных линий. Следовало бы дать оценки этих искажений и описать методы их учета и коррекции; 2) при рассмотрении процесса формирования сигнала не учитывается шум – зачастую ключевой фактор, определяющий эффективность спектральной аппаратуры. Из рис. 7 и 8 видно, что при экспериментальных исследованиях разработанной системы он присутствует. Следовало бы описать основные факторы, определяющие его наличие и тип, а также привести оценку величины шума в рассматриваемой системе. Данное замечание вкупе с замечанием 1 ставит под сомнение корректность приведенного на стр. 8 утверждения «решена основная задача теории спектральных измерений для спектрального прибора – установлена связь между физическим и математическим спектром»; 3) не раскрыто, в чем заключается представляющая практический интерес «методика формирования топологии расположения штрихов дифракционной решетки, позволяющая успешно выполнять спектральные измерения в третьем и четвертом дифракционных порядках». Было бы полезно привести соотношения между геометрическими параметрами, характеризующими топологию решетки, и параметрами спектральных линий различных порядков дифракции; 4) используются не вполне лексически корректные выражения, например, «повышение разрешающей способности...метода», «отсутствует динамика взаимодействия анализируемого сигнала и спектрального прибора», «связь вход-выход прибора от его входной апертуры до результата считывания», и др., что несколько затрудняет восприятие.

13. ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (подготовил профессор кафедры «Экспериментальная физика», д. ф.-м. н., профессор В.Е. Привалов). Замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их известностью своими достижениями в данной отрасли,

наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность результатов диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **Разработана** математическая модель спектрального преобразования и детектирования, реализованных в спектральном приборе с дифракционной решеткой на основе последовательного рассмотрения преобразования оптического сигнала всеми элементами прибора.

2. **Разработана** методика формирования топологии высокопрядковой дифракционной решетки, позволяющая улучшить разрешающую способность прибора за счет работы в высоких дифракционных порядках.

3. **Установлены** важнейшие свойства спектров, формируемых прибором, в различных дифракционных порядках, создающие возможность улучшения разрешающей способности прибора путем введения пространственной модуляции функции пропускания дифракционной решетки.

4. **Разработана** методика оценки влияния пространственных искажений сигнала при передаче по волоконно-оптической системе передачи на разрешающую способность прибора.

5. С учетом установленных свойств формируемых прибором дифракционных спектров в различных порядках, а также неравномерности спектральной чувствительности ПЗС-линейки и частотной характеристики оптического волокна **разработан** алгоритм последетекторной обработки результатов считывания оптического спектра.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: изложено описание разработанной математической модели спектрального преобразования и детектирования, реализованных в спектральном приборе с дифракционной решеткой, на основе не применявшегося ранее в оптической спектрометрии математического аппарата (теория сигналов, теория

линейных систем, теория функций с двойной ортогональностью) и последовательного рассмотрения распространения и преобразования оптического сигнала от входной апертуры прибора до результата считывания спектра;

раскрыты важнейшие свойства формируемых прибором спектров в различных порядках, а также связь между входным оптическим сигналом, представленным в виде комплексного спектра, и его энергетическим аппаратным спектром, регистрируемым спектральным прибором;

изложен способ повышения разрешающей способности прибора путем неэквидистантного расположения штрихов дифракционной решетки разной ширины, позволяющей работать в высоких дифракционных порядках;

изучено влияние пространственных искажений оптического сигнала в случае использования волоконно-оптической системы передачи на результат анализа спектра путем оценки уширения аппаратной функции прибора.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

представлен способ повышения разрешающей способности спектрального прибора на 15% за счет использования четвертого дифракционного порядка при анализе спектра;

определены возможности и перспективы практического использования разработанной системы оптического спектрального контроля в задачах исследования и управления физическими и технологическими процессами в экстремальных условиях;

изложена методика расчета параметров оптических элементов системы вывода излучения из волоконно-оптической системы передачи, учитывающая дифракционную расходимость оптического излучения от торца волокна, позволяющая минимизировать энергетические потери;

изложен подход к разработке процедуры и алгоритма последетекторной обработки результатов считывания оптического спектра, содержащий правила пересчета пространственной шкалы в частотную в виде нелинейного

преобразования, а также учитывающий неравномерность спектральной чувствительности ПЗС-линейки и частотной характеристики волоконно-оптической системы передачи, что позволяет производить коррекцию результатов считывания оптического спектра;

результаты исследования **представлены** в виде актов внедрения в работы по государственному заданию высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности (проект № 8.9203.2017/8.9 «Исследование и разработка нового поколения устройств спектрально-корреляционного анализа сигналов оптического диапазона для экстремальных условий эксплуатации»); а также по грантам РФФИ продолжающихся НИР № 17-07-00826, № 17-07-00554, № 16-07-00549 и завершенных НИР №13-07-00238, №15-37-20446;

результаты исследования **использованы и внедрены** в учебный процесс кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения в качестве методик по выполнению лабораторных и курсовых работ по дисциплинам «Основы квантовой электроники», «Оптическая обработка информации», «Основы оптики», «Когерентная оптика».

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

теория построена на известных, достоверных и проверенных фактах, согласуется с полученными экспериментальными данными;

идея базируется на исследованиях отечественных и зарубежных авторов, обобщении передового опыта ведущих исследователей в сфере оптического спектрального контроля и бесконтактной оптической спектроскопии;

корректно использованы методы радиооптики, системного подхода, теории линейных систем, функционального анализа, волоконной оптики, когерентной оптики, теории сигналов, теории интегралов Фурье, компьютерного моделирования и физического эксперимента.

Личный вклад автора состоит в следующем:

автором лично выполнены все этапы диссертационного исследования: постановка задач, разработка математической модели спектрального преобразования и детектирования в приборе с дифракционной решеткой, оценка влияния передачи сигнала по волоконно-оптической системе передачи на результат анализа спектра прибором, разработка топологии высокопорядковой дифракционной решетки, экспериментальные исследования по измерению спектров тестовых оптических источников разработанным лабораторным макетом системы оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой, формулировка выводов.

На заседании 01 октября 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Казакову В.И. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 10 докторов наук по специальности 05.11.13, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



Ларин Валерий Павлович

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

Шелест Дмитрий Константинович

Шелест Дмитрий Константинович

01 октября 2019 года