

Ваганов Михаил Александрович

Разработка и исследование многоканального резонаторного
спектрометра оптического диапазона

Специальность 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной
физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2013

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Гармонический анализ относится к числу важнейших физических измерений, особенно при исследовании сигналов оптического диапазона. В оптическом диапазоне, в отличие от радиодиапазона, где возможно исследование сигналов и во временном пространстве (осциллографирование), и в спектральном пространстве (анализ спектров), динамические сигналы оптического диапазона можно исследовать лишь с помощью спектральных приборов, осциллографическое наблюдение оптических сигналов в настоящее время не представляется возможным.

Особую роль гармонический анализ играет в спектроскопии как радио-, так и оптического диапазона. При спектроскопических измерениях приборы исследуют электромагнитное излучение как сигнал, посылаемый материей и несущий информацию не только о химическом составе вещества, но и об его агрегатном состоянии, температуре, о физических и химических процессах, происходящих в нем, а также о физических свойствах среды, через которую распространяется излучение. Переносчиком спектроскопической информации является динамический сигнал. Эта информация закодирована в следующих измеряемых параметрах - энергии излучения в отдельных участках спектра, а также в ширине и форме наблюдаемых спектральных линий.

Методами спектроскопии исследуются различные виды спектров, и зачастую эти методы являются единственно возможными, например, при изучении весьма удаленных или труднодоступных объектов. Наиболее широкое распространение получили исследования спектров излучения и спектров поглощения.

Параллельно развиваются как традиционные методы спектральных измерений, так и новые находящие все более широкое применение.

Существующие системы измерения спектра оптических сигналов, построенные по традиционному принципу, выполняют контактный анализ, при котором анализируемое излучение непосредственно падает на вход спектрального прибора. В то же время существует целый ряд актуальных задач, где получение спектроскопической информации невозможно при непосредственном контакте спектральной аппаратуры с полем излучения источников. К числу таких задач относятся изучение процессов горения, например, в двигателях внутреннего сгорания и ракетных двигателях, а также оптимизация процессов горения в теплоэнергетических установках; контроль и управление различными технологическими процессами, протекающих в условиях повышенной температуры, влажности, агрессивной химической среды, повышенного уровня взрывоопасности.

Решение отмеченных задач порождает острую потребность в спектральных приборах, позволяющих проводить бесконтактный анализ спектра оптического излучения, исключая непосредственный контакт спектрального прибора с полем излучения источника. При бесконтактном анализе оптический сигнал падает не на вход спектрального прибора, а сначала передается на безопасное для прибора расстояние от источника, например, с помощью оптического волокна.

Разнообразие задач, решаемых методами оптической спектроскопии, приводит к необходимости создания широкой номенклатуры спектральных приборов оптического диапазона и разработки целого ряда методов измерения спектров динамических сигналов, а высокий уровень развития оптического спектрального приборостроения требует хорошо разработанной теории спектральных измерений.

В данной диссертационной работе разрабатывается и исследуется многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона, спектральное разложение в котором выполняется набором резонаторных блоков. В данном спектрометре для передачи оптических сигналов на его вход и ввода их в резонаторные блоки, каждый из которых содержит резонатор оптического диапазона (узкополосный интерференционный оптический фильтр), настроенный на определенную частоту (длину волны), используется волоконно-оптическая система, которая состоит из формирующей оптики и волоконно-оптического жгута. Такой прибор реализует бесконтактный анализ спектра оптического излучения.

Рассматриваемый многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона принципиально отличается от известных оптических спектральных приборов, и, следовательно, требует нового специального теоретического описания, выполненного на основе математического аппарата, который в спектрометрии раньше не применялся.

Разработка и исследование предлагаемого в данной диссертационной работе многоканального спектрометра с передачей анализируемых сигналов по волоконно-оптическому жгуту лежит в русле дальнейшего развития и совершенствования теории и практики оптической спектрометрии, что подчеркивает актуальность, проводимых в работе исследований.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка и исследование многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона, с передачей анализируемых сигналов по волоконно-оптическому жгуту; теоретическое описание процесса измерения спектров оптических сигналов разработанным многоканальным спектрометром и его экспериментальное исследование.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

1. Предложить и обосновать схему построения многоканального спектрометра оптического диапазона, выполняющего параллельный анализ спектра набором резонаторов оптического диапазона.
2. Разработать теоретический подход к описанию процесса измерения спектров оптических сигналов на основе общих положений теории линейных систем, теории сигналов и принципов детектирования оптических сигналов.
3. Выполнить теоретическое описание действия резонаторной системы многоканального спектрометра.
4. Провести теоретическое описание получения энергетического спектра оптических сигналов многоканальным спектрометром.
5. Разработать и создать лабораторный макет многоканального резонаторного спектрометра с передачей анализируемых сигналов по волоконно-оптическому жгуту.

6. Экспериментально подтвердить работоспособность разработанного лабораторного макета.

Методы решения задач. При проведении теоретического описания процесс анализа спектра оптических сигналов разрабатываемым многоканальным спектрометром целесообразно разделить на два этапа. Сначала вычисляется комплексный спектр анализируемого оптического сигнала с помощью анализатора комплексного спектра, который входит в состав многоканального спектрометра и представляет собой его резонаторную систему. Второй этап заключается в дальнейшей обработке комплексного спектра детектирующей системой спектрометра для получения энергетического спектра, который является результатом спектрального измерения в оптическом диапазоне.

Теоретические исследования опираются на сформулированные в математической теории гармонического анализа и теории сигналов понятия спектральных функций временных частот и их преобразований линейными системами. И исследование действия резонаторной системы спектрометра должно опираться на методы теории линейных систем с привлечением теории сигналов, где линейность устанавливается относительно мгновенных значений. В силу специфики рассматриваемого прибора, состоящего из n параллельных каналов, к его теоретическому описанию необходимо применить методы матричного исчисления.

В рамках системного подхода резонаторная система спектрометра рассматривается как многомерная линейная система, действие которой описывается линейным интегральным оператором. Ядром этого оператора является матричная аппаратная функция, которая вводится впервые в данной диссертационной работе. Такой подход устанавливает связь между математическим понятием спектра и аппаратным, т.е. физическим спектром, получаемым на выходе резонаторной системы.

Применяемая методология соответствует понятию радиооптики, под которой понимается определенный подход, характеризующийся перенесением известных идей и методов теоретической радиотехники в оптику, и наоборот. Данный радиооптический подразумевает перенос идеи и метода параллельного анализа спектров, известных в радиодиапазоне, в теорию и практику оптической спектрометрии.

Специфика детектирования в оптическом диапазоне, результатом чего является измерение энергетических величин, потребовала переход от комплексного спектра к энергетическому спектру. Этот переход был выполнен с применением специального математического аппарата теории вытянутых волновых сфероидальных функций.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложена новая схема построения многоканального спектрометра оптического диапазона, выполняющего параллельный анализ спектров сигналов набором резонаторов оптического диапазона.

2. Новизна разрабатываемого спектрометра заключается в применении набора резонаторов оптического диапазона и волоконно-оптического жгута, используемого для ввода излучения в резонаторы и позволяющего удалить прибор на нужное расстояние от источника оптического излучения, тем самым, исключить непосредственный контакт спектрометра с полем излучения источников.
3. Проведено теоретическое описание процесса измерения спектра многоканальным спектрометром на основе математического аппарата, который в оптической спектрометрии раньше не применялся.
4. Получено соотношение в матричной форме, устанавливающее связь между истинным комплексным спектром и получаемым комплексным спектром на выходе резонаторной системы спектрометра.
5. Получено основное соотношение теории спектральных измерений в матричной форме, которое устанавливает связь между истинным распределением энергии по спектру (энергетическим спектром) и спектральным распределением энергии по спектру, полученным экспериментально с помощью спектрометра.
6. Матричная форма полученных соотношений предложена впервые.
7. Показано, что многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона может быть охарактеризован двумя матричными аппаратными функциями – комплексной и энергетической.
8. Разработанная теоретическая база позволяет описывать в рамках единого подхода процесс измерения спектра оптическими спектральными приборами параллельного типа. Теоретические выкладки, полученные в результате анализа действия резонаторной системы многоканального спектрометра, могут быть также применены к описанию измерения спектра параллельными анализаторами радиосигналов.
9. Разработан лабораторный макет многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона.
10. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие работоспособность разработанного макета.

Новизна разрабатываемого спектрометра подтверждается полученным на него патентом РФ № 86734.

Практическая значимость диссертационной работы:

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований открывают путь создания технических средств бесконтактной оптической спектроскопии на основе многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона и позволяют разрабатывать устройства для решения целого ряда конкретных практических задач таких как, диагностика состояния жидкостных ракетных двигателей, автоматизация технологических процессов выплавки стали, крашения текстильных материалов и т.п.
2. Согласно Федеральному закону № 217-ФЗ СПбГУАП создал малое инновационное предприятие ООО «ФАНТОМ», войдя в уставной капитал стоимостью патента РФ №86734, материалы которого стали основой при написании данной диссертационной работы.

3. Полученные в рамках написания данной диссертационной работы результаты стали основой проекта, поданного ООО «ФАНТОМ» на участие в проекте создания и обеспечения функционирования инновационного центра «Сколково». В результате независимой экспертизы представленного проекта по существу ООО «ФАНТОМ» выдано Свидетельство № 1120390 от 7 ноября 2012 года о присвоении статуса участника проекта создания и обеспечения функционирования инновационного центра «Сколково». ООО «ФАНТОМ» стал участником кластера космических технологий и телекоммуникаций.
4. Полученные результаты также стали основой проекта, поданного ООО «ФАНТОМ» в Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере на участие в открытом конкурсе для субъектов малого предпринимательства по программе «Старт-2013». На данный момент ООО «ФАНТОМ» признан победителем по Лоту №1 «Выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по приоритетным направлениям развития науки и техники в рамках реализации Программы «СТАРТ-2013» по направлению Информационные технологии» и получил 1 млн. руб. на выполнение проекта. В данный момент выполняется НИОКР по контракту № 11572р/20938 по теме «Исследование и разработка приемно-регистрирующего блока системы диагностики сплава», в основу которой легли результаты данной диссертационной работы.
5. Научные исследования, выполненные в рамках данной диссертационной работы, являются составной частью научно-исследовательских работ, проводимых по грантам РФФИ № 10-07-00371, № 11-07-00308 и № 13-07-00238.
6. На базе разработанного лабораторного макета многоканального резонаторного спектрометра с передачей анализируемых сигналов по волоконно-оптическому жгуту поставлены демонстрационные лабораторные работы по курсам «Основы оптики» и «Основы теории оптических сигналов» на кафедре электроники и оптической связи СПбГУАП.
Вышеуказанное подтверждается актами о внедрении.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная схема построения многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона позволяет технически реализовать иной класс спектрометров, выполняющих параллельный анализ спектра набором резонаторов оптического диапазона с применением волоконно-оптического жгута, в качестве линии передачи анализируемого сигнала.
2. Проведенный теоретический анализ действия резонаторной системы многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона позволил получить соотношение в матричной форме, устанавливающее связь между истинным комплексным спектром и получаемым комплексным спектром на выходе резонаторной системы.
3. Теоретический анализ многоканального спектрометра в целом позволил получить основное соотношение теории спектральных измерений в матричной форме, которое устанавливает связь между истинным распределением энергии по спектру (энергетический спектр) и спектральным

распределением энергии по спектру, полученным экспериментально с помощью спектрометра.

4. Разработанный лабораторный макет многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона экспериментально подтвердил возможность создания спектрометров такого типа, и является основой при разработке технических средств бесконтактной оптической спектроскопии для решения целого ряда конкретных практических задач таких как, диагностика состояния жидкостных ракетных двигателей, автоматизация технологических процессов выплавки стали, крашения текстильных материалов и т.п.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на X, XI, XII, XIII, XIV, XV международных молодежных научных конференциях «Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems» (Санкт-Петербург, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 гг.); на научной сессии ГУАП (Санкт-Петербург, 2011, 2013 гг.); на X Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» (г. Таганрог, 2010 г.); на VI Международной научно-технической конференций «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики "АНТЭ-2011"» (г. Казань, 2011 г.); на международных научных конференциях «Лазеры, измерения, информация» (Санкт-Петербург, 2011, 2012 гг.); на Международных научных симпозиумах «SPIE Optics + Photonics» (г. Сан-Диего, США, 2010, 2011, 2012, 2013 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 24 печатных работах, 2 из которых – патенты, 3 – статьи в изданиях, рекомендованных ВАК России, 16 – публикации в материалах российских и международных форумов и конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

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 – 138 страница, включая 45 рисунков и 3 таблицы. Список используемой литературы содержит 110 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Сформулирована актуальность темы диссертации, указаны ее цели и задачи, методы решения задач, научная новизна работы и практическая значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, содержатся сведения об апробации работы и её структуре.

Первый раздел. Выполнен обзор технических средств современной оптической спектрометрии, а также обзор аналитических методов радио- и оптической спектрометрии. Последнее обусловлено тем, что теоретическое описание разрабатываемого многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона выполнено с применением методов теоретической радиотехники. Рассматриваются принципы получения спектроскопической информации в оптическом диапазоне: контактный и бесконтактный.

Выполнен обзор традиционных спектральных приборов оптического диапазона, выполняющих контактный анализ спектра, и проведен их сравнительный анализ.

Рассмотрены оптические спектральные приборы бесконтактного анализа спектра. Проведенный анализ показал, что данные приборы обладают целым рядом недостатков и не способны решать задачи, где выполнение спектральных измерений невозможно при непосредственном контакте спектральной аппаратуры с полем излучения источников.

Рассмотрены два новых принципа построения спектральных приборов, выполняющих бесконтактный анализ спектра оптического излучения набором резонаторных блоков. Первый принцип реализован в виде оптического спектрометра на базе волоконных брэгговских решеток, второй – в виде многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона. Реализации обоих принципов в виде устройств защищены патентами Российской Федерации. Выделены достоинства этих спектрометров по сравнению с традиционными оптическими спектральными приборами контактного и бесконтактного анализа.

Многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона является объектом исследования в данной диссертационной работе.

Рассмотрены аналитические методы радио- и оптической спектрометрии. Показаны важные аспекты теории современной оптической спектрометрии, которые все еще остаются недостаточно разработанными и требуют более детального исследования.

Второй раздел. Важнейшей задачей теории спектральных измерений является установление связи между спектром истинным (математическим) и аппаратурным спектром (физическим), получаемым с помощью измерительной спектральной аппаратуры. Установление связи между математическим и физическим спектрами представляет собой содержание одной из важнейших теорем теории колебаний и волн, и эта связь является базой всей теории спектральных измерений, независимо от диапазона анализируемых частот и принципов действия спектрального прибора.

Анализ спектра оптического излучения предлагается описывать с позиций теории линейных систем, теории сигналов и радиооптического подхода, который отражает иное направление развития радиооптики. Этот подход характеризуется перенесением идей и методов параллельного анализа спектров, известных в теоретической радиотехнике, в теорию и практику оптической

спектрометрии и применением понятий комплексного спектра и частотных функций при спектральной обработке сигналов оптического диапазона.

Измерительный процесс является видом информационного процесса, и в данной диссертационной работе под оптическим спектральным прибором понимается информационная измерительная система, которая состоит из формирующей оптики, анализатора комплексного спектра, детектирующей системы и блока обработки спектроскопической информации. Выходом анализатора комплексного спектра является комплексный спектр, подлежащий детектированию с помощью фотоприемного устройства для получения энергетического спектра, который является результатом спектрального измерения в оптическом диапазоне. В процессе описания спектральных измерений комплексные спектры рассматриваются как первичные, а энергетические - как вторичные.

Анализатор комплексного спектра, являющийся резонаторной системой многоканального спектрометра оптического диапазона, рассматривается как линейная система.

В общем случае связь между входом и выходом линейной системы устанавливается на основе определения ее исчерпывающей характеристики, под которой в теории линейных систем понимается отклик системы на соответствующее δ – воздействие. Соотношение, устанавливающее связь вход-выход линейной системы, записывается как:

$$y(\xi) = \hat{L}x(\xi) = \int_{\Xi} A(\xi, \xi') \cdot x(\xi') d\xi', \quad (1)$$

где \hat{L} – линейный ограниченный оператор; $x(\xi)$, $y(\xi)$ – вход и выход линейной системы, соответственно; $A(\xi, \xi') = \hat{L}\delta(\xi - \xi')$ – аппаратная функция - исчерпывающая характеристика линейной системы.

Физически это означает, что аппаратная функция рассматривается как реакция линейной системы на соответствующее δ – воздействие.

В теории спектральных измерений δ – функция имеет специфический характер, и у нее нет наглядного представления в отличие от δ – функций, используемых в других областях науки, и она может быть введена формально, как прямое преобразование Фурье от гармонического колебания.

В случае спектральных измерений в оптическом диапазоне аппаратная функция определяется как реакция прибора на монохроматическое излучение. Поэтому комплексная аппаратная функция анализатора комплексного спектра вводится следующим образом:

$$A(\omega, \omega') = \hat{S}_w \hat{V} \hat{F}^{-1} \delta(\omega - \omega'). \quad (2)$$

где \hat{S}_w – линейный ограниченный оператор, описывающий действие анализатора комплексного спектра; \hat{V} – линейный ограниченный оператор перехода от колебательного процесса к волне; \hat{F}^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье; $\hat{S}_w \hat{V} \hat{F}^{-1} = \hat{L}$.

Из выражения (2) виден смысл аппаратной функции анализатора комплексного спектра, как реакции на δ – воздействие в частотной области, что полностью согласуется с теорией линейных систем.

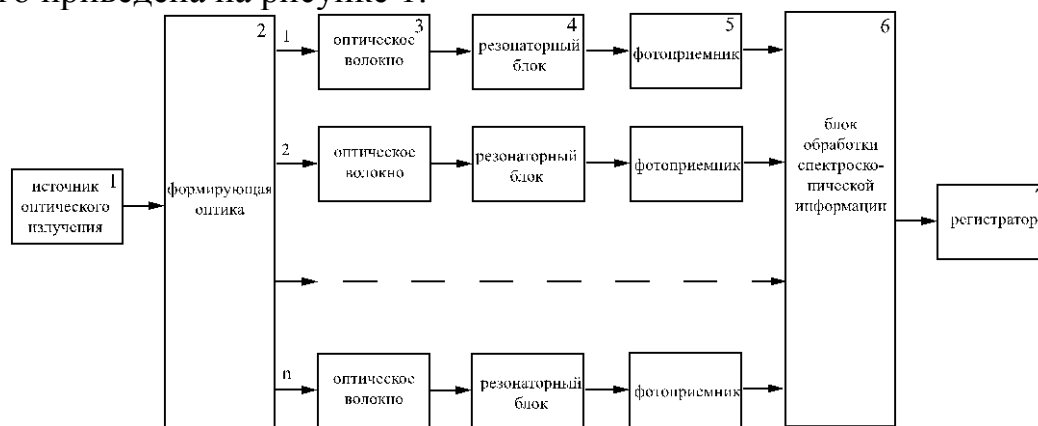
Помимо известных переменных во времени спектров (текущего и мгновенного) в теорию спектральных измерений вводятся еще два: выборочный и мгновенный в форме, отличной от предложенной А.А. Харкевичем.

Показано, что аппаратная функция зависит не только от частоты, но и от времени, а связь вход-выход анализатора комплексного спектра определяется следующим образом:

$$S_a(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, \omega', t) \cdot S(\omega') d\omega', \quad (3)$$

где $A(\omega, \omega', t)$ – комплексная аппаратная функция, зависящая еще и от времени как от параметра; $S_a(\cdot)$ – комплексный аппаратный (физический) спектр; $S(\cdot)$ – комплексный спектр сигнала на входе анализатора комплексного спектра, т.е. истинный (математический) спектр.

Третий раздел. Принцип построения оптического спектрального прибора, выполняющего параллельный анализ спектра оптических сигналов, впервые был предложен в патенте РФ №86734 и реализован в форме многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона, структурная схема которого приведена на рисунке 1.



1 – источник оптического излучения; 2 – формирующая оптика; 3 – оптическое волокно; 4 – резонаторные блоки; 5 – фотоприемники; 6 – блок обработки спектроскопической информации; 7 – регистратор

Рисунок 1 - Структурная схема многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона

В этом приборе спектральное разложение анализируемых оптических сигналов основано на явлении резонанса, т.е. путем использования набора резонаторов оптического диапазона. Согласно терминологии принятой в оптике резонатор оптического диапазона называется узкополосным интерференционным оптическим фильтром. Для ввода оптического излучения в резонаторные блоки, каждый из которых содержит резонатор, настроенный на определенную частоту (длину волны), предназначен волоконно-оптический

жгут, что позволяет перенести спектрометр на безопасное для него расстояние от источника оптического излучения, и тем самым, исключить непосредственный контакт прибора с полем излучения источника.

Совокупность оптических волокон и резонаторных блоков образуют анализатор комплексного спектра, т.е. резонаторную систему многоканального спектрометра, а набор фотоприемников – его детектирующую систему.

Резонаторная система спектрометра является многомерной линейной системой, поэтому необходимо представить соотношение, устанавливающее связь вход-выход анализатора комплексного спектра в виде адекватном параллельному анализу, т.е. в матричной форме.

В общем случае передача сигнала многомерной линейной системой описывается следующим образом:

$$\|y_j\| = \|H_{ij}\| \cdot \|x_j\|, \quad (4)$$

где $\|y_j\|$ – матрица-столбец выходов; $\|H_{ij}\|$ – передаточная матрица многомерной линейной системы, которая является ее исчерпывающей характеристикой; $\|x_j\|$ – матрица-столбец входов.

Резонаторная система является многомерной линейной системой без перекрестных связей между каналами, которая называется автономной системой, и ее свойства характеризуются диагональной матрицей. Поэтому аппаратная функция анализатора комплексного спектра имеет матричную форму, а спектральная обработка оптического сигнала анализатором комплексного спектра определяется следующим соотношением:

$$\|S_{ak}(\omega, t)\| = \int_{-\infty}^{\infty} \text{diag}\{A_{kk}(\omega_k, \omega', t)\} \cdot \|S(\omega')\| d\omega', \quad (5)$$

где $A_{kk}(\omega_k, \omega', t)$ – «парциальная» аппаратная функция k -го канала резонаторной системы, т.е. отчетное значение аппаратной функции анализатора комплексного спектра, определяемой диагональной матрицей.

Принимая во внимание то, что все каналы анализатора комплексного спектра одинаковые, дальнейший теоретический анализ выполнялся для одного канала. Тогда комплексная «парциальная» аппаратная функция k -го канала резонаторной системы:

$$A_{kk}(\omega_k, \omega', t) = K_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot B_{kk}(\omega') \cdot e^{i\omega't}, \quad (6)$$

где $B_{kk}(\omega')$ – передаточная функция отрезка оптического волокна, $K_{kk}(\omega_k, \omega')$ – передаточная функция k -го резонатора.

Подставив соотношение (6) в равенство (3), получим соотношение, описывающее преобразование спектра в k -ом канале:

$$S_{ak}(\omega_k, t) = \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot B_{kk}(\omega') \cdot S(\omega') e^{i\omega't} d\omega'. \quad (7)$$

Применение теоремы о спектре произведения двух функций к соотношению (7) дает:

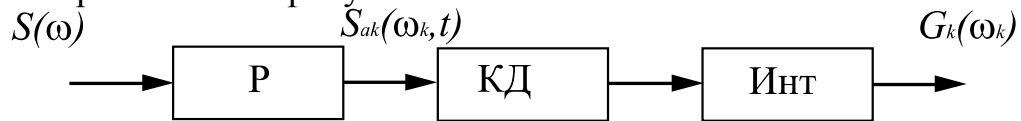
$$S_{ak}(\omega_k, t) = e^{i\omega_k t} \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot H_k(t - \tau) \cdot e^{-i\omega_k \tau} d\tau. \quad (8)$$

где $H_k(t)$ – комплексная огибающая импульсной реакции резонатора.

Выражение (8) представляет комплексный текущий спектр с весовой функцией, причем физически текущий спектр проявляется в форме модуляции несущего колебания $\exp(i\omega_k t)$, а его комплексная огибающая соответствует выражению текущего спектра, введенного А.А. Харкевичем.

При оптических спектральных измерениях оперируют с энергетическими спектрами, поэтому полученный на выходе резонаторной системы комплексный спектр подлежит дальнейшей обработке для получения энергетического спектра оптического сигнала.

Все детекторы в оптическом диапазоне являются квадратичными, а при регистрации спектра оптического излучения нужно учесть значительную инерционность фотоприемника по отношению к периоду оптических колебаний. Процедура фотодетектирования инерционным фотоприемником описывается безинерционным квадратичным детектированием с последующим временным интегрированием фототока, либо фильтрацией с помощью фильтра нижних частот. В первом случае процесс анализа энергетического спектра оптического сигнала в одном канале можно представить функциональной схемой, изображенной на рисунке 2.



Р – резонатор, КД – квадратичный детектор, Инт – интегратор, $S(\omega)$ – сигнал на входе спектрометра, $S_{ak}(\omega_k, t)$ – комплексный спектр на выходе k -го канала резонаторной системы спектрометра, $G_k(\omega_k)$ – энергетический спектр оптического сигнала на выходе k -го канала спектрометра.

Рисунок 2 – Функциональная схема вычисления энергетического спектра оптического сигнала

Учитывая, что комплексный спектр пропорционален напряженности электрической компоненты оптического излучения, математическая форма последовательности операций, представленных на рисунке 2, имеет вид:

$$G_k(\omega) = \int_{\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} i_k(t) dt = P_k(\omega_k) \int_{\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} |S_{ak}(\omega, t)|^2 dt = \int_{\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} S_{ak}(\omega, t) S_{ak}^*(\omega, t) dt, \quad (9)$$

где $P_k(\omega_k)$ – коэффициент, учитывающий спектральную чувствительность фотоприемника для k -го канала; T_R – время интегрирования; $t_0 = -\frac{T_R}{2}$.

При подстановке соотношения (7) в (9) получим:

$$G_k(\omega) = P_k(\omega_k) \int_{\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} dt \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}(\omega_k, \omega') B_{kk}(\omega') S_0(\omega') e^{i\omega' t} d\omega' \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}^*(\omega_k, \omega'') B_{kk}^*(\omega'') S_0^*(\omega'') e^{-i\omega'' t} d\omega'' \quad (10)$$

Применение теории вытянутых волновых сфероидальных функций дает энергетический спектр на выходе k -го канала спектрометра в форме:

$$G_k(\omega) = (\Delta\omega_k)^2 P_k(\omega_k) \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} |K_{kk}(\omega_k, \omega')|^2 \cdot |B_{kk}(\omega')|^2 \cdot |S_0(\omega')|^2 d\omega' = \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} W_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot G(\omega') d\omega', \quad (11)$$

где $G(\omega')$ – энергетический спектр анализируемого колебания (математический спектр), $G(\omega') = |S(\omega')|^2$; $W_{kk}(\omega_k, \omega') = P_k(\omega_k) \cdot |K_{kk}(\omega_k, \omega')|^2 \cdot |B_{kk}(\omega')|^2$ – «парциальная» энергетическая аппаратная функция k -го канала спектрометра.

Тогда соотношение, описывающее получение энергетического спектра оптического сигнала многоканальным спектрометром, запишется как:

$$\|G_{ak}(\omega, t)\| = \int_{-\infty}^{\infty} \text{diag}\{W_{kk}(\omega_k, \omega')\} \cdot \|G(\omega')\| d\omega', \quad (12)$$

Полученное соотношение устанавливает связь между истинным распределением энергии по спектру (энергетическим спектром) и спектральным распределением энергии по спектру, полученным экспериментально с помощью многоканального спектрометра.

С учетом соотношения (6) диагональную матричную энергетическую аппаратную функцию можно представить как:

$$\begin{aligned} \text{diag}\{W_{kk}(\omega_k, \omega')\} &= \text{diag}\{|K_{kk}(\omega_k, \omega')|^2\} \cdot \text{diag}\{|B_{kk}(\omega')|^2\} \cdot \|P_k(\omega_k)\| \\ &= \text{diag}\{A_{kk}(\omega_k, \omega')^2\} \cdot \|P_k(\omega_k)\|, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\|P_k(\omega_k)\|$ – матрица – столбец коэффициентов, учитывающих спектральную чувствительность фотоприемника для каждого канала многоканального спектрометра.

Таким образом, многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона может быть охарактеризован двумя матричными аппаратными функциями: комплексной и энергетической.

Полученный результат является основой для решения одной из важнейших задач теории статистических измерений, а именно получение оценки энергетического спектра оптических излучений с помощью многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона.

Четвертый раздел. Приводятся результаты экспериментального исследования разработанного многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона, фотографии лабораторного макета и отдельных его блоков, а также некоторые конструктивные сведения.

В качестве источника оптического излучения использовались лампа накаливания мощностью 60 Вт и металлогалогенная лампа мощностью 150Вт. Перед проведением эксперимента были измерены значения мощности оптического излучения на выходе функциональных узлов лабораторного макета, результаты измерений позволяют установить пороговую чувствительность блока обработки спектрометрической информации, значение

которой будет являться исходной величиной при разработке промышленного образца многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона.

Приведены полученные спектральные диаграммы лампы накаливания и металлогалогенной лампы.

Полученные результаты экспериментальных исследований являются обнадеживающими и подтверждают работоспособность разрабатываемого спектрометра, что открывает путь создания технических средств бесконтактной оптической спектроскопии такого типа. Данные результаты являются основой при разработке оптических спектральных приборов такого типа для решения целого ряда конкретных практических задач таких как, диагностика состояния жидкостных ракетных двигателей, автоматизация технологических процессов выплавки стали, крашения текстильных материалов и т.п.

Рассмотрен вопрос применения разрабатываемого прибора для диагностики жидкостного ракетного двигателя по спектру излучения его факела. Данная диагностика основана на слежении за появлением и динамикой свечения в факеле ракетного двигателя спектральных линий химических элементов, являющихся продуктами разрушения конструкционных материалов двигателя: Fe, Cr, Al, Mg, Ni, Ti, Mn, W, Mo, Cu, V и др. Приведены значения длин волн атомарных линий химических элементов продуктов разрушения конструкционных материалов, которые необходимо анализировать для решения поставленной задачи. Для того чтобы по спектру отождествить химический элемент достаточным является количество каналов анализа спектра многоканального спектрометра - 30 и спектральное разрешение спектрометра - 1 нм.

Показано, что для решения задачи автоматизации процесса крашения текстильных материалов достаточно иметь три канала анализа спектра многоканального спектрометра.

Приложение 1. Рассмотрены основные аспекты теории вытянутых волновых сфероидальных функций.

Приложение 2. Приведены скан-копии страниц из каталога оптических фильтров фирмы Omega Optical, Inc, содержащих информацию об основных характеристиках узкополосных оптических фильтрах.

Заключение. В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты:

- 1) Предложена новая схема построения многоканального спектрометра оптического диапазона, выполняющего параллельный анализ спектров сигналов набором резонаторов оптического диапазона.
- 2) Разработанный спектрометр оптического диапазона выполняет бесконтактный анализ спектра оптических сигналов, что позволяет анализировать источники оптического излучения, непосредственный контакт прибора, с полем излучения которых, невозможен, либо нежелателен.

- 3) По сравнению с существующими оптическими спектральными приборами, которые последовательно анализируют спектр оптического излучения, многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона выполняет спектральные измерения параллельным методом, что значительно увеличивает его быстродействие и исключает возможность пропуска редко повторяющихся и одиночных импульсов.
- 4) Теоретическое описание процесса измерения спектра многоканальным спектрометром выполнено в рамках единого теоретического подхода, опирающегося на теорию сигналов, теорию многомерных линейных систем, методы теоретической радиотехники, методы матричного исчисления и принципы детектирования оптических сигналов. Разработанный подход одинаково пригоден для описания параллельных анализаторов спектра, как радио-, так и оптического диапазона.
- 5) При описании процесса анализа спектра оптических сигналов многоканальным спектрометром был применен специфический подход, при котором процесс измерения был разделен на два этапа: анализ комплексного спектра с помощью анализатора комплексного спектра, являющегося резонаторной системой многоканального спектрометра, и последующая обработка полученного комплексного спектра детектирующей системой спектрометра для получения энергетического спектра.
- 6) Показано, что комплексную аппаратную функцию, которая является исчерпывающей характеристикой спектрометра, следует рассматривать как действие линейного ограниченного оператора на δ – воздействие в частотной области, что полностью согласуется с теорией линейных систем.
- 7) Поскольку разработанный спектрометр является многоканальным, его резонаторная система была рассмотрена как многомерная автономная линейная система, и ее исчерпывающая характеристика – аппаратная функция, введена в матричной форме. Представление аппаратной функции резонаторной системы спектрометра в матричной форме было выполнено впервые.
- 8) Получено соотношение в матричной форме, устанавливающее связь между истинным комплексным спектром и получаемым комплексным спектром на выходе резонаторной системы спектрометра.
- 9) Результатом спектральных измерений в оптическом диапазоне является энергетический спектр, поэтому был выполнен переход от комплексного спектра к энергетическому спектру.
- 10) Получено основное соотношение теории спектральных измерений в матричной форме, которое устанавливает связь между истинным распределением энергии по спектру (энергетическим спектром) и спектральным распределением энергии по спектру, полученным экспериментально с помощью спектрометра.
- 11) Впервые показано, что многоканальный спектрометр оптического диапазона может быть охарактеризован двумя матричными аппаратными функциями: комплексной и энергетической.
- 12) Разработан лабораторный макет многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона.

- 13) Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие работоспособность разработанного макета.
- 14) Результаты теоретических и экспериментальных исследований открывают путь создания технических средств бесконтактной оптической спектроскопии на основе многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона и являются основой при разработке устройств для решения целого ряда конкретных практических задач таких как, диагностика состояния жидкостных ракетных двигателей, автоматизация технологических процессов выплавки стали, крашения текстильных материалов и т.п.
- 15) Приведенные выше области возможного использования результатов разработки подчеркивают актуальность, проводимых научных исследований в рамках данной диссертационной работы.
- 16) Новизна разрабатываемого спектрометра подтверждается полученным на него патентом РФ № 86734, а практическая ценность – положительным внедрением результатов работы и полученными положительными оценками инновационного центра «Сколково» и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Ваганов, М.А. Параллельный анализ спектра динамических сигналов/ М.А. Ваганов, О.Д. Москалец// Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 15-22.
2. Ваганов, М. А. Анализ спектров в оптическом диапазоне. Резонаторный анализ / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец // Информационно-управляющие системы. 2012. №6. С. 21 – 27.
3. Ваганов, М. А. Многоканальный спектральный прибор для диагностики жидкостного ракетного двигателя / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец, С. В. Кулаков // Информационно-управляющие системы. 2013. №1. С. 2 – 6.

Патенты:

4. Пат. 86734 РФ, МПК⁸ G 01 J 3/26. Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона / И. Н. Архипов, М. А. Ваганов, С. В. Кулаков, Е. Н. Котликов, О. Д. Москалец, Л. Н. Пресленев, В. Н. Прокашев (РФ). № 2009116195/22 // Изобретения и полезные модели. 2009. № 25. 2 с.
5. Пат. 100241 РФ, МПК⁸ G 01 J 3/26. Оптический анализатор спектра сигналов / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец, Л. Н. Пресленев, (РФ). № 2010127591/28// Изобретения и полезные модели. 2010. № 34. 2 с.

В сборниках трудов Всероссийских и международных конференций:

6. Vaganov, M. A. System approach the description of optical spectrum measurements by spectrum device with the transfer of analyzed signals by optical fiber/ М. А. Vaganov, О. D. Moskaletz // Proc. of XI International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2008. P. 23.

7. Vaganov, M. A. Parallel measurement method of spectrum of signal / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of XII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2009. P. 26.
8. Vaganov, M. A. The optical spectrum analyzer of the parallel type / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz, L. N. Preslnev // Proc. of XIII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2010. P. 22.
9. Vaganov, M. A. The parallel spectrum analyzer of optical signals/ M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz, L. N. Preslnev, I. N. Arkhipov// Proceedings of SPIE Optics + Photonics 2010. Optics and Photonics for Information Processing IV, Bellingham, WA, 2010. Vol. 7797. P. 77970X-1 - 77970X-12.
10. Ваганов, М. А. Анализатор спектра на базе оптических резонаторов / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец, Л. Н. Пресленев // Сборник материалов X Всероссийской научной конференции. Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления. Таганрог, 2010. С. 21-22.
11. Arkhipov, I. N. The device of reading, processing and indication of spectrometric information / I. N. Arkhipov, M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of XIII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2010. P. 50.
12. Arkhipov, I. N. Multi-channel parallel optical spectrum analyzer / I. N. Arkhipov, M. A. Vaganov // Proc. of XII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2011. P. 15.
13. Ваганов, М. А. Аппаратура для одновременного анализа спектра сигналов в оптическом диапазоне / М. А. Ваганов // Сб. докл. научной сессии ГУАП. СПбГУАП. СПб, 2011. С. 3-5.
14. Архипов, И. Н. Устройство считывания спектроскопической информации для многоканального анализатора спектра оптических сигналов / И. Н. Архипов, М. А. Ваганов, О. Д. Москалец // Сборник трудов VII международной конференции молодых ученых и специалистов «ОПТИКА – 2011», СПб: НИУИТМО, 2011. С. 407-408.
15. Ваганов, М. А. Многоканальный анализатор спектра оптических сигналов / М. А. Ваганов, И. Н. Архипов, О. Д. Москалец // Сборник докладов 21 Международной конференции “ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ-2011”. Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2011. С. 110-125.
16. Ваганов, М. А. Оценка энергетического спектра оптического излучения резонансным методом / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец // Материалы VI Международной научно-технической конференции. Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011». Казань, КНИТУ-КАИ, 2011. С. 343-351.
17. Vaganov, M. A. Estimation of an energy spectrum of optical radiation in multi - channel resonator system / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of XII Int. conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2011. P. 13.

18. Moskalev, A.V. The standard wideband source of white light radiation for adjustment of optical spectrum analyzer/ A.V. Moskalev, M.A. Vaganov// Proc. of XII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, p.17, 2011.
19. Vaganov, M. A. Spectrum analysis of optical signals is based on the resonance phenomenon / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz// Proc. of SPIE Optics and Photonics for Information Processing IV, Vol. 8134. - Bellingham, WA, 2011. – P. 81340C-1 - 81340C-10.
20. Kazakov, V. I. Power optical signals spectrum assessment using resonance spectral analysis method / V. I. Kazakov, A. Y. Zhdanov, M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of SPIE. Optics and Photonics for Information Processing VI. Bellingham, WA, 2012. Vol. 8498. P 849812-1 - 849812-8.
21. Ваганов, М. А. Матричный анализ многоканального спектрального прибора оптического диапазона/ О. Д. Москалец, М. А. Ваганов // Сб. докл. 22-й Международной конференции «ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ». Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2012. Т. 1. С. 117 - 130.
22. Vaganov, M. A. The optical spectral device as multidimensional linear system / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of XV International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2012. P. 29.
23. Sal'nikov, M.V. The computer simulation of characteristics of the optical spectral device's units/ M.V. Sal'nikov, M.A. Vaganov //Proc. of XV Int. conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, p.58, 2012.
24. Vaganov, M. A. The multichannel spectral device with transmitting analyzed optical signals by the optical fiber for the liquid propellant rocket engine diagnostics/ M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz// Proc. of SPIE Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIV, Vol. 8841. - Bellingham, WA, 2013. – P. 884114 -1 - 884114 -8.