

Марков Сергей Николаевич

ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С
НЕКЛАССИЧЕСКИМИ ДИФРАКЦИОННЫМИ РЕШЕТКАМИ И
МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Специальность: 05.11.07 –
«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Бажанов Ю. В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Бойко В. А.

кандидат технических наук,
Савушкин А. В.

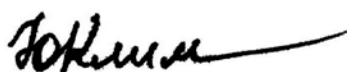
Ведущая организация: ОАО «Центральный
научно-исследовательский
технологический институт
Техномаш»

Защита состоится «_____» _____ 2009г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., д.4, МИИГАиК (зал заседаний ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК

Автореферат разослан «_____» _____ 2009г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Климков Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Как известно, оптическая система спектрального прибора состоит из коллимирующего, диспергирующего и фокусирующего элементов. Объединить функции этих оптических элементов в одном впервые удалось Роуланду, когда он создал вогнутую сферическую отражательную дифракционную решётку. С тех пор шло совершенствование решёток, в частности, появились неклассические вогнутые дифракционные решётки (ВДР) с неравноотстоящими искривлёнными штрихами, aberrации которых скорректированы. Применение в спектральных приборах многоэлементных приёмников излучения (МПИ), как и в большинстве оптико-электронных приборов, принесло большие преимущества, связанные с оперативностью регистрации спектров и возможностью их обработки на компьютере. Новые возможности в выборе оптической схемы прибора возникают также при использовании ввода и вывода излучения с помощью оптических волокон.

Применение новой элементной базы невозможно без создания методов расчёта и оптимизации их aberrационных и энергетических характеристик, а также разработки оптических систем приборов и устройств, максимально полно реализующих преимущества неклассических ВДР и МПИ. Решению этих актуальных вопросов посвящена настоящая работа.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является создание универсальных методов расчёта характеристик и оптимизации параметров ВДР и разработка на этой основе оптических систем приборов и устройств с повышенными оптическими и эксплуатационными характеристиками.

Указанная цель достигается путём решения следующих задач:

- разработка методов оптимизации параметров решёток и схем для их использования;

- расчёт новых оптических схем с максимальным использованием преимуществ, даваемых многоэлементными приёмниками;
- разработка оптических систем нового поколения приборов с учётом их применения в различных областях науки и техники.

Объект исследования

Спектральные приборы и волоконно-оптические устройства с неклассическими дифракционными решётками.

Методика исследования

Рассмотрение вопросов в диссертационной работе основано на анализе литературных данных, выполнении теоретических исследований и проверке достоверности результатов по данным численного моделирования и экспериментальных исследований.

Научная ценность работы

Научная ценность работы состоит в том, что в ней впервые:

1. Получены выражения для интегральных критериев качества спектрального изображения, даваемого вогнутой решёткой, включающие в себя функцию зрачка оптической системы.
2. Разработан численно-аналитический метод, в котором, наряду с оптимизацией параметров вогнутых дифракционных решёток, проводится автоматический выбор оптической схемы.
3. Разработан аналитический метод компенсации дефокусировки с одновременной оптимизацией всех параметров оптической схемы спектрометра с плоским полем при заданном угле падения.
4. Получены оптимальные оптические схемы спектрометров с плоским и круговым полями изображения.
5. Предложены новые малогабаритные многоцелевые вертикальные схемы с повышенными характеристиками.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в:

1. Программной реализации:
 - аналитического метода минимизации дефокусировки с оптимизацией всех параметров оптической схемы спектрометра с плоским полем при заданном угле падения и частоте штрихов;
 - численно-аналитического метода оптимизации оптической схемы, включающий оптимизацию по углу падения излучения на решётку и частоте штрихов решётки.
2. Рекомендациях по применению вогнутых нарезных и голограммных решёток в различных типах спектральных приборов.
3. Разработке и создании спектральных приборов нового поколения:
 - малогабаритного спектрометра «FSD8»;
 - монолитного спектрометра «OPTUS»;
 - десятиканального мульти-демультиплексора для ВОСП;
 - полихроматора атомно-эмиссионного спектрометра «ЛАЭС-спектр».

На защиту выносятся:

1. Численно-аналитический метод оптимизации параметров ВДР, гарантирующий нахождение глобального минимума функции в виде интегрального критерия качества спектрального изображения, включающего функцию зрачка при автоматическом выборе оптической схемы спектрометра.
2. Аналитический метод компенсации дефокусировки с одновременной оптимизацией всех параметров оптической схемы спектрометра с плоским полем при заданном угле падения.
3. Результаты расчётов и анализ оптимальных оптических схем спектрометров с плоским и круговым полями изображения.
4. Оптические схемы и результаты испытаний изготовленных приборов для различных видов спектрального анализа, а также демультиплексоров для волоконно-оптических линий связи.

Личный вклад автора

Все принципиальные предложения по методам оптимизации принадлежат автору. Им разработана большая часть методов и алгоритмов расчёта оптических систем. При его участии проведено проектирование оптико-электронных систем приборов, а также разработка их конструкции. Он принимал участие в юстировке, наладке приборов и анализе результатов их испытаний.

Апробация работы

Основные результаты представлены на 2-х международных конференциях и научно-технической конференции студентов и молодых ученых МИИГАиК.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 6 научных работ, из них 3 статьи, 2 трудов и 1 тезис доклада на конференции, в том числе 3 статьи в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём составляет: 141 страница машинописного текста, 30 таблиц, 33 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ***введении*** обосновывается актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы, а также приведены задачи, решаемые в процессе выполнения работы.

В ***первой главе*** проведён обзор спектральных приборов с вогнутыми дифракционными решётками.

В **п.1.1** приведены основные характеристики спектральных приборов с ВДР. Указано, что разрешающая способность в данной работе будет определяться как произведение полуширины аппаратной функции спектрометра (АФС) на величину обратной линейной дисперсии (ОЛД), а для

оптимизации параметров решётки будут использоваться интегральные критерии качества изображения и оптическая передаточная функция (ОПФ).

В п.1.2 приведена современная теория aberrаций вогнутых решёток, основанная на разложении в ряд по координатам на решётке функции оптического пути ФОП. Коэффициенты aberrаций выражаются как

$$V_{ijk} = M_{ijk} - \frac{k\lambda}{e_0} G_{ijk}, \quad (1)$$

где M_{ijk} – коэффициенты разложения части ФОП, зависящей от схемы расположения решётки, k – порядок спектра, λ – длина волны, e_0 – величина периода в центре решётки, а G_{ijk} – коэффициент, зависящий от картины штрихов и выраженный через геометрические параметры штрихов решётки:

$$\epsilon(y) = e_0 \cdot (1 + \mu y + \nu y^2 + \xi y^3 + \dots), \quad \rho(y) = \rho_0 - py - qy^2, \quad (2)$$

где величины μ , ν , ξ , p и q – коэффициенты ряда, выражающего изменение шага и кривизны штрихов решётки.

В работе приведены выражения для коэффициентов нарезных решёток R_{ijk} , изготовленных при наклонённой плоскости резания и коэффициенты голограммных решёток H_{ijk} , определяемые положением источников записи. Используя соотношения:

$$V_{ijk} = M_{ijk} - \frac{k\lambda}{e_0} R_{ijk}, \quad V_{ijk} = M_{ijk} - \frac{k\lambda}{\lambda^*} H_{ijk}, \quad (3)$$

можно получить уравнения, связывающие эти коэффициенты с коэффициентами G_{ijk} .

Ввиду всего этого, оптимизация характеристик ВДР ведётся через геометрические параметры, а затем, используя полученные уравнения связи, вычисляются параметры нарезных и голограммных решёток.

В п.1.3 приведена классификация многоэлементных приёмников излучения и даны их основные оптические параметры и характеристики. Рассмотрены основные типы МПИ, достоинства и недостатки каждого

типа: ПЗС – структуры; ПЗИ – структуры; фотодиодные решетки; решётки активных ячеек.

Во *второй главе* приводятся методы расчёта оптимальных параметров дифракционных решёток. Рассмотрены схемы с постоянным углом падения, которые используются главным образом в спектрографах при неподвижной входной щели, при этом поверхность приёмника может иметь различную форму: плоскость, цилиндр, набор плоскостей и т.д. (см. рисунок 1). На рисунке 1 приведена схема спектрометра с постоянным углом падения (входная щель не показана); точка O – центр решётки, FF' – кривая фокусировки, AA' – ближайшая прямая, находящаяся под углом ψ к главному лучу и MM' – ближайшая окружность радиуса R с центром в точке C .

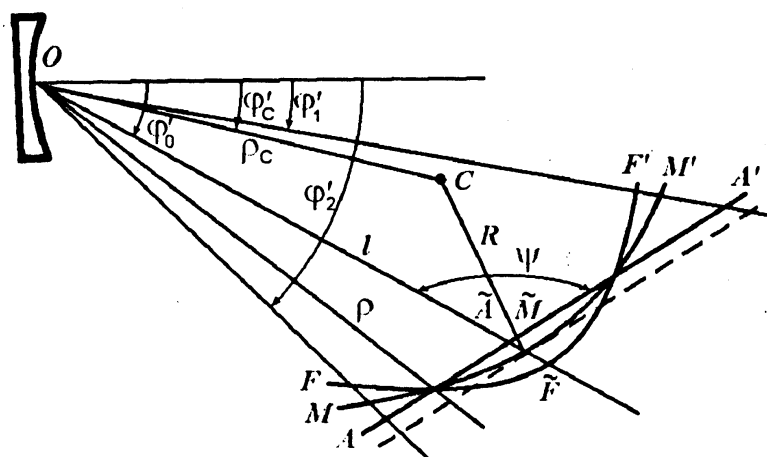


Рисунок 1. Схема спектрометра с постоянным углом падения (входная щель не показана)

В п.2.1 приводятся методы минимизации aberrаций первого порядка по рабочей спектральной области прибора. Aberrации первого порядка (дефокусировка и астигматизм), как правило, оказывают на суммарные aberrации системы максимальное влияние. В связи с этим необходимо минимизировать их в первую очередь. Величины aberrаций дефокусировки и астигматизма 1-го порядка определяются коэффициентами разложения ФОП V_{200} и V_{020} .

Наиболее простым методом компенсации этих aberrаций является приравнение соответствующих коэффициентов aberrаций нулю для заданной длины волны. Однако такое решение не будет оптимальным по всей рабочей области спектра прибора. Ввиду этого для минимизации aberrаций 1-го порядка используется известный метод, основанный на минимизации по спектральной области соответствующего коэффициента aberrаций:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_{ijk} \frac{\partial V_{ijk}}{\partial \alpha} d\lambda = 0, \quad (4)$$

где $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ – рабочая область длин волн, а α – параметр, по которому ведется минимизация. Величина V_{200} зависит от трех величин: расстояний до входной щели прибора и её изображения d и d'_0 , а также от коэффициента изменения шага μ , поэтому в общем случае необходимо составить три уравнения типа (4) и решать их относительно этих параметров совместно.

В работе приводится решение этой системы уравнений аналитическим методом. Метод реализован с помощью программы MathCAD. Для приближённого решения компенсации остальных aberrаций аналитическим методом можно их aberrационные коэффициенты приравнять нулю для средней длины волны рабочего спектрального диапазона. Достоинством метода является возможность его реализации с помощью обычных систем аналитического программирования без разработки специальных программ.

В работе также приводится численно-аналитический метод компенсации дефокусировки, в котором сначала аналитически решается система из уравнений типа (4) относительно параметров d'_0 и μ , а затем численно оптимизируется величина расстояния d и угла наклона плоскости изображения к главному лучу ψ . Таким образом, для заданных угла падения и частоты штрихов решётки могут быть найдены все параметры, определяющие оптическую схему спектрометра.

В п.2.2 приводится метод компенсации aberrаций 2-го и 3-го порядков с использованием критерия в виде величины, выражающей усредненную сумму квадратов aberrаций по зрачку системы и функции передачи

модуляции. Рассмотрены формы оправ дифракционной решётки, ограничивающих её заштрихованную часть: круговая, прямоугольная симметричная и прямоугольная смещённая относительно её геометрического центра.

Заключительным этапом является численная оптимизация оценочных функций в виде критериев качества спектрального изображения по последним оставшимся параметрам оптической схемы, ранее не входившие в расчёты, а именно по углу падения излучения на решётку и по частоте штрихов. В результате всего этого появляется возможность автоматического выбора оптической схемы спектрального прибора.

Существует большое количество схем спектральных приборов, различающихся типом сканирования спектра, т.е. взаимным перемещением решетки и щелей относительно друг друга. В настоящей работе рассматриваются наиболее распространённые на практике схемы с постоянным углом падения и плоской или цилиндрической поверхностью изображения, однако разработанный метод позволяет рассматривать общие схемы, вводя дополнительные условия на вид фокальной поверхности или тип сканирования спектра.

В настоящей работе оптимизация ведётся по геометрическим параметрам, описывающим положение и форму штрихов решётки, т.е. рассматривается произвольная картина штрихов на поверхности решётки. Затем по уравнениям, связывающим геометрические параметры с параметрами нарезания или голографирования, происходит переход к реально изготовимым решёткам. При этом учитываются технологические ограничения того или иного типа решёток.

Оптимизация по геометрическим параметрам штрихов решётки делает метод расчёта универсальным в том смысле, что он может быть использован не только для существующей технологии нарезных и голограммных решёток, но и при её развитии, кроме этого, развиваются и альтернативные методы изготовления решёток, например, метод прямой записи сканирующим

лазерным или электронным пучком.

В п.2.3 описана программная реализация разработанных методов расчёта. Методы компенсации aberrаций 1-го и 3-го порядков и методика автоматического выбора оптической схемы прибора программно интегрированы и реализованы на персональном компьютере. В работе приведена блок-схема программы и её краткое описание.

В *третьей главе* приводятся результаты расчётов в схемах с плоской и цилиндрической поверхностью регистрации спектра. Используя численно-аналитический метод, рассмотренный в предыдущей главе, можно рассчитать оптимальные схемы спектральных приборов с неклассическими вогнутыми решётками. Под оптимальной схемой в данном случае будем понимать схему, в которой, при заданных значениях входной апертуры и линейной дисперсии, достигается максимальная разрешающая способность спектрального изображения. Для нахождения оптимальной схемы варьируются величина радиуса решётки, расстояния до входной щели и приёмника излучения, углы наклона приёмника, углы падения и дифракции (вследствие изменения частоты штрихов решётки).

В п.3.1 систематически исследованы различные варианты схем с плоским полем изображения (автоколлимационные, неавтоколлимационные, симметричные и несимметричные). В качестве примеров для расчёта использовались схемы малогабаритных спектрометров с одной многоэлементной линейкой приемников в диапазоне длин волн 300 – 850 нм, с обратной линейной дисперсией 25 нм/мм, с числовой апертурой равной 0,2, при ширине входной щели 50 мкм. Расчёты проводились для частот решётки в горизонтальной схеме, в которой все оптические элементы находятся в меридиональной плоскости ($z = 0$) и вертикальной схеме, когда входная щель расположена от меридиональной плоскости на расстояние $z = 5$ мм.

Расчёты показали, что для схем, где плоскость приёмника расположена перпендикулярно к главному лучу ($\psi = 90^\circ$, см. рисунок 1), при заданном значении ОЛД, наименьшими aberrациями обладают схемы, включающие в

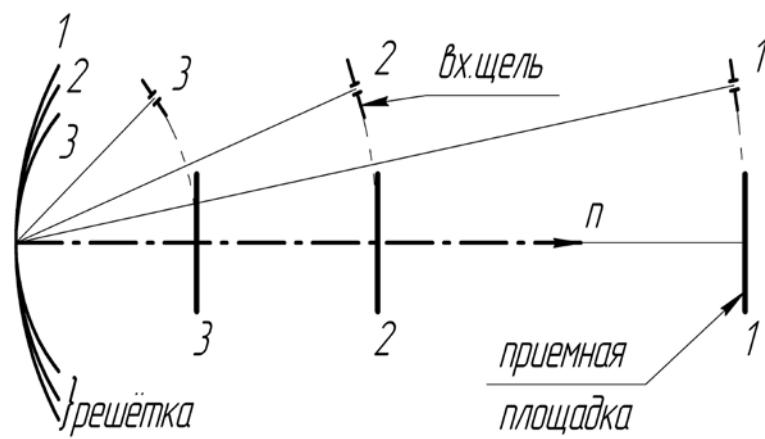
себя решётки с минимальной частотой штрихов и с максимально большими радиусами кривизны поверхности. В таблице 1 для различных частот решётки приведены параметры схемы и величины полуширины АФС b_a решёток с скорректированными абберациями в симметричных автоколлимационных и неавтоколлимационных схемах.

Таблица 1

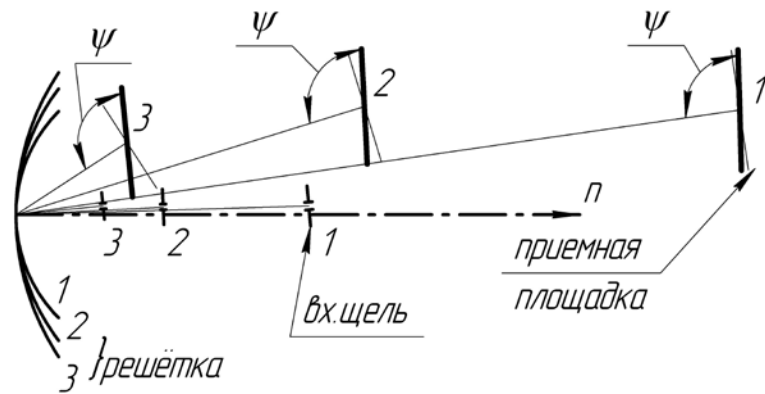
Параметры схемы и полуширина АФС в симметричных схемах: A – автоколлимационных; H – неавтоколлимационных.

	z , мм	N , мм ⁻¹	φ , °	r , мм	$d = d'$, мм	b_a , мм				
						$\lambda=300$ нм	$\lambda=410$ нм	$\lambda=575$ нм	$\lambda=740$ нм	$\lambda=850$ нм
A	0	300	4,95	132,80	133,17	0,17	0,05	0,05	0,08	0,06
		600	9,93	65,66	66,31	0,25	0,07	0,05	0,07	0,05
		1200	20,18	31,28	32,25	0,89	0,07	0,05	0,07	0,07
	5	300	4,95	132,80	133,17	0,22	0,10	0,05	0,10	0,20
		600	9,93	65,66	66,31	0,44	0,19	0,05	0,20	0,40
		1200	20,18	31,28	32,25	0,70	0,30	0,10	0,40	0,70
H	0	300	9,99	133,30	132,16	0,193	0,051	0,145	0,050	0,203
		600	20,30	66,66	64,32	0,355	0,063	0,296	0,058	0,425
		1200	42,80	33,33	29,08	0,540	0,117	0,567	0,182	0,901
	5	300	10,02	133,30	132,15	0,520	0,324	0,518	0,324	0,202
		600	19,41	66,67	64,67	0,992	0,813	0,604	0,420	0,474
		1200	41,15	33,33	29,60	1,216	1,214	1,127	0,716	0,986

На рисунке 2,а приведено положение входной щели и её спектрального изображения для оптических схем, представленных в таблице 1 для произвольной (неавтоколлимационной) схемы. При оптимизации угла падения u всех полученных оптических схем приёмная площадка располагается на нормали решётки. Объясняется это тем, что только в этом случае приёмная площадка будет оптимальным образом располагаться относительно меридиональной фокальной кривой, которая симметрична относительно нормали решётки. Для автоколлимационных, симметричных схем приёмные площадки совпадают с расположением входных щелей.



а)



б)

Рисунок 2. Положение входной щели и её спектрального изображения:
 а) для симметричных схем при $\psi = 90^\circ$, б) для несимметричных схем при оптимальных значениях угла ψ : положение 1 соответствует значению $N = 300 \text{ мм}^{-1}$; 2 - $N = 600 \text{ мм}^{-1}$; 3 - $N = 1200 \text{ мм}^{-1}$.

На рисунке 2,б показана несимметричная схема при оптимизации угла ψ . В результате оптимизации имеем практически обратную схему с большими углами дифракции и малыми углами падения.

В таблице 2 приведены параметры схемы и полуширина АФС в горизонтальной и вертикальной симметричной и несимметричной схемах при дополнительной оптимизации частоты штрихов и радиуса кривизны решётки, т.е. при автоматическом выборе оптической схемы. В приведённом примере для несимметричной схемы изображение входной щели почти в 2,5 раза больше, чем для симметричной, поэтому при уменьшении ширины входной щели b полуширина АФС b_a в несимметричной схеме будет уменьшаться быстрее, чем в симметричной, до тех пор, пока величины aberrаций будут

оставаться меньше ширины щели. В таблице 2 приведены расчёты для ширины входной щели 50 мкм и 20 мкм.

Таблица 2

Величина полуширины АФС при автоматическом выборе параметров оптической схемы для симметричного и несимметричного расположения источника и приёмника излучения.

b , мкм	N , мм ⁻¹	φ , °	φ' , °	r , мм	d , мм	d' , мм	b_a , мм				
							$\lambda=300$ нм	$\lambda=410$ нм	$\lambda=575$ нм	$\lambda=740$ нм	$\lambda=850$ нм
50	215,8	1,4	5,3	184	184	184	0,15	0,05	0,10	0,05	0,16
	326,2	1,8	9,0	69,5	48,7	121	0,15	0,13	0,12	0,13	0,13
20	215,8	1,4	5,3	184	184	184	0,12	0,02	0,07	0,02	0,13
	326,2	1,8	9,0	69,5	48,7	121	0,07	0,06	0,04	0,05	0,05

Из таблицы 1 следует, что при высоте расположения входной щели 5 мм в данной схеме разрешение прибора падает в 2 – 3 раза. Положение изменится, если воспользоваться многокристальными сборками, содержащими в одном корпусе несколько приёмных площадок. В этом случае расстояние между приёмниками излучения значительно уменьшится и может составлять 1 – 1,5 мм. В результате появляется возможность разработки многощелевых спектрометров, у которых входные щели и приёмники излучения располагаются вертикально друг над другом в несколько рядов. Для того, чтобы каждый приемник работал в заданном порядке спектра, необходимо в каждый из каналов поместить оптический фильтр, отсекающий излучение высших порядков. Разместим щели и приёмники излучения над и под меридиональной плоскостью (рисунок 3,а), а в случае автоколлимационной схемы приёмники и источники располагаются с разных сторон от меридиональной плоскости (рисунок 3,б).

Для оценки эффективности этих схем рассмотрим пример автоколлимационной симметричной схемы при $N = 300 \text{ мм}^{-1}$, в которой спектральная область 200 – 800 нм располагается на одной линейке. Для вертикальной двухщелевой схемы примем частоту решётки 450 мм^{-1} при этом, поделим спектральную область 200 – 800 нм на два диапазона: 400 – 800 нм в 1-ом порядке спектра и 200 – 400 нм во 2-ом порядке.

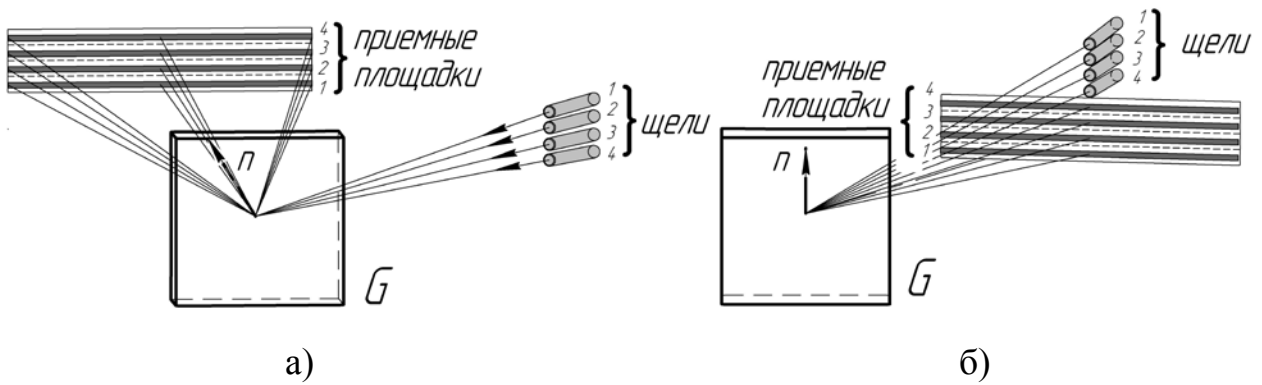


Рисунок 3. Схематическое изображение многощелевых схем спектрометров: а) – автоколлимационная схема ($\varphi = \varphi'_0$); б) – схема с расположением приёмной площадки на нормали к решётке ($\varphi'_0 = 0$).

Как известно величина ОЛД равна

$$\frac{d\lambda}{d\lambda} = \frac{\cos \varphi' \sin \psi}{kNd'}, \quad (5)$$

Где φ' , ψ , k , N , d_0' – углы дифракции и наклона плоскости приёмника, порядок спектра, частота штрихов решётки и расстояние до плоскости изображения соответственно. Из последнего соотношения очевидно, что при делении спектральной области на две линейки, величина ОЛД уменьшается в два раза для длинноволновой области (1-ый порядок) и в четыре раза для коротковолновой области (2-ой порядок). Для сравнения приводятся результаты расчета схемы с двумя линейками, расположенными в меридиональной плоскости при $N = 600 \text{ мм}^{-1}$. На рисунке 4 показана зависимость величины предела разрешающей способности при различном делении спектрального диапазона по приёмникам.

В п.3.2 Исследованы схемы с круговой поверхностью регистрации спектра с фокусировкой на окружности Роуланда, либо с фокусировкой на окружности, ближайшей к фокали при произвольном расположении оптических элементов схемы. В качестве примеров для расчёта использовались схемы крупногабаритных спектрометров высокого разрешения с набором многоэлементных линеек приемников излучения.

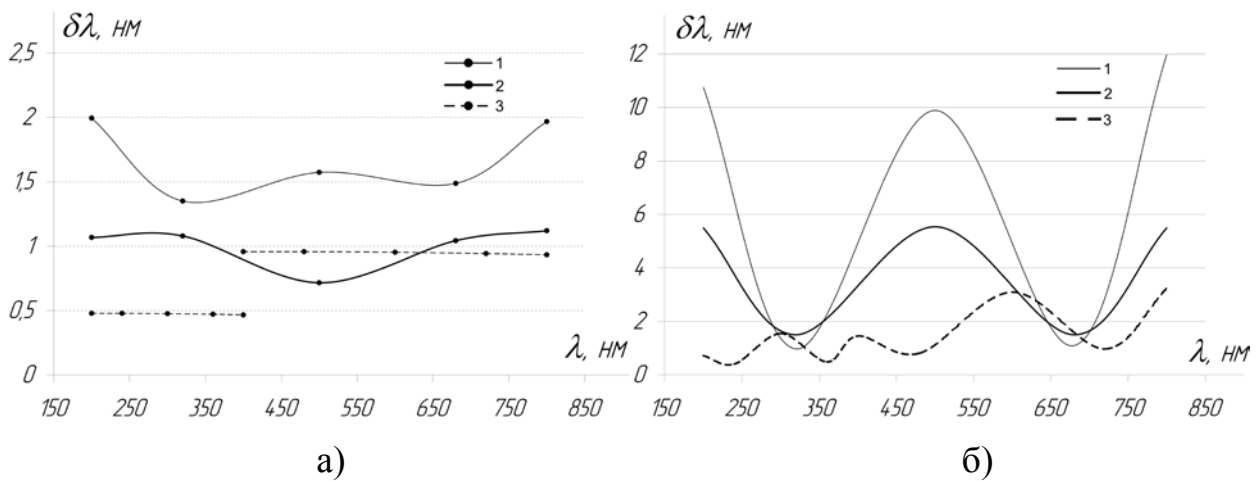


Рисунок 4. Зависимость предела разрешающей способности в автоколлимационной схеме (а) и схеме с расположением приемной площадки на нормали к решётки (б) при различном делении спектрального диапазона по приемникам: кривая 1 – одна линейка, кривая 2 – две линейки в горизонтальной схеме, кривая 3 – две линейки в вертикальной схеме.

Поскольку в схемах на круге Роуланда меридиональная кома отсутствует ($V_{300} = 0$), то единственной aberrацией 2-го порядка является сагиттальная кома ($V_{120} \neq 0$), влияние aberrаций 3-го порядка не так значительно. На практике оптимальные схемы нарезных решёток на круге Роуланда определяются ограничениями в изготовлении, накладываемых законом изменения кривизны штрихов. Штрихи нарезной решётки могут быть только концентрическими, т. е. величина $p = 1$. В работе показано, что компенсация сагиттальной комы возможна лишь в схеме автоколлимации либо в схеме, когда входная щель или центр спектрограммы находятся недалеко от нормали к решётке. Исходя из этого, в методике для нахождения оптимальных схем на круге Роуланда отсутствует поиск оптимального угла падения для заданной частоты решётки, а рассматриваются лишь три перечисленные выше схемы. Расчёты проводились для различных частот решётки. Результаты расчётов АФС показали, что полуширина АФС в автоколлимационной схеме и схеме нормального падения в 1,5 – 2 раза меньше, чем в схеме, когда приёмник располагается на нормали к решётке. В таблице 3 приведены результаты для решётки 1200 мм^{-1} (ОЛД равна 0,8 нм/мм, ширина входной щели 10 мкм).

Параметры схемы и полуширина АФС в различных схемах на круге

Роуланда

φ	φ_0'	r , мм	d , мм	d_0' , мм	b_a , мм				
					$\lambda=200$ нм	$\lambda=250$ нм	$\lambda=325$ нм	$\lambda=400$ нм	$\lambda=450$ нм
11,3	11,2	985	965	965	0,011	0,014	0,016	0,018	0,020
23,1	0	1004	923	1004	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0	22,9	1004	1004	923	0,011	0,011	0,012	0,013	0,015

Приведены также расчёты в схемах, отличных от круга Роуланда, даны рекомендации по их использованию.

В п.3.3 приводятся рекомендации по оптимизации параметров оптического тракта спектрометра с учётом различных факторов, влияющих на основные параметры прибора.

Важным элементом при оптимизации оптических параметров спектрального прибора является учёт реальной функции зрачка оптической системы, которая характеризуется формой зрачка и распределением коэффициента пропускания по его площади.

Зрачок оптической схемы спектрального прибора на основе вогнутой решётки находится на самой решётке, которая обычно имеет форму прямоугольника. Методы расчётов, изложенные в настоящей работе, позволяют провести оптимизацию отношения сторон этого прямоугольника в зависимости от баланса аберраций в оптической системе.

В п.2.2 приведена оценочная функция для случая, когда центр заштрихованной части решетки $Y \times Z$ смещён относительно её геометрического центра на определённую величину y_0 . Для примера взята схема сверхсветосильного спектрального прибора с вогнутой голограммной решёткой радиусом 92,55 мм, размером 132×132 мм², при угле падения излучения на решётку $14,55^\circ$. В таблице 3 приведены характеристики схемы спектрометра с учетом и без учета смещения заштрихованной части решётки относительно её геометрического центра.

Характеристики схемы спектрометра с учетом и без учета смещения заштрихованной части решётки относительно её геометрического центра

λ , нм	ОЛД, нм/мм		b_a , мм		$\delta\lambda$, нм	
	$y_o=0$	$y_o=14,88$	$y_o=0$	$y_o=14,88$	$y_o=0$	$y_o=14,88$
320	18,25	18,25	1,3	1,0	23,7	18,3
366	18,25	18,25	1,5	0,9	27,4	16,4
435	18,24	18,24	1,6	1,0	29,2	18,2
504	18,23	18,23	1,3	1,1	23,7	20,0
550	18,22	18,22	1,1	1,1	20,0	20,0

Полученные выражения для интегральных критериев качества спектрального изображения с учётом функции зрачка используются в компьютерной программе оптимизации параметров. На рисунке 5 приведены величины полуширины АФС, когда оптимизация и расчёт характеристик ведётся без учёта (кривые 1) и с учётом (кривые 2) дифракционной эффективности решётки со ступенчатой формой штрихов и освещения решётки стандартным волокном диаметром 100 мкм.

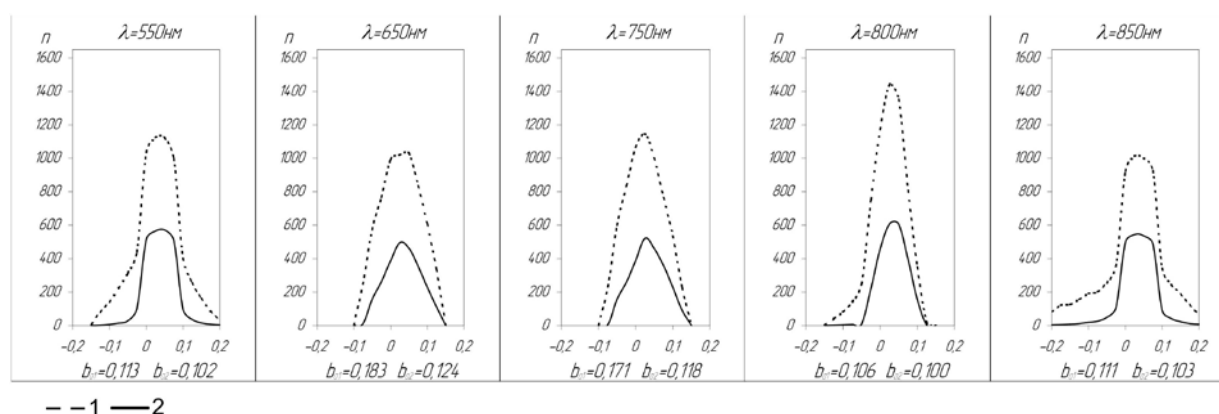


Рисунок 5. Величины полуширины АФС: кривые 1-без учета, кривые 2 с учетом коэффициента пропускания решетки

Кроме этого, даны рекомендации по учёту основных характеристик приёмника излучения: длина светочувствительной площадки, размер пиксела и чувствительность.

В *четвёртой* главе описаны спектральные приборы, изготовленные по схемам, разработанным с использованием методик, предложенных в настоящей работе. Представлены краткие описания оптико-электронных

систем этих приборов для различных видов спектрального анализа: атомно-эмиссионного, атомно-абсорбционного и флуоресцентного.

В п.4.1 сообщается о разработке оптической системы сенсора мини-спектрометра с волоконно-оптическим входом «FSD8». В отличие от спектрометров ведущих западных фирм, в оптических схемах которых используется либо плоская решётка с коллимирующим и фокусирующим зеркалами, либо вогнутая решётка с искривлёнными неравноотстоящими штрихами, в настоящем приборе без потери качества спектрального изображения удалось ограничиться единственным простым в изготовлении оптическим элементом - вогнутой классической решёткой. Оптическая схема прибора представляет собой автоколлимационную вертикальную схему, при этом плоскость приёмника повёрнута относительно главного луча, проходящего через центр решётки на угол $\psi = 90^\circ + \varphi'_0$. Достоинством данной схемы является отсутствие меридиональной комы и составляющих аберраций 2-го порядка по высоте щели, что позволяет получить достаточно высокие характеристики в этом классе приборов при невысокой стоимости оптической системы прибора.

Технические характеристики:

спектральный диапазон, нм.....240–1000;
разрешение при ширине щели 50мкм, нм.....2;
числовая апертура0,22;
размер решетки, мм²16×16.

Спектрометр выпускается НТЦ «Волоконно-оптические устройства», г. Москва.

В п.4.2 сообщается о разработке и изготовлении монолитного спектрометра «OPTUS». Спектрометр предназначен для атомно-абсорбционного анализа жидкостей, однако может быть использован для атомно-эмиссионного и флуоресцентного анализов веществ в жидкой, газообразной и твёрдой фазе. В рассматриваемом спектральном приборе используется высокоэффективная неклассическая дифракционная решётка с

неравноотстоящими искривлёнными штрихами. Оптическая схема реализована по горизонтальной схеме, в которой все элементы расположены в плоскости дисперсии. Спектрометр представляет собой монолитную конструкцию из кварцевого стекла, на одной стороне которой нанесена вогнутая дифракционная решётка, а на противоположной расположены приёмник излучения и жгут оптических волокон, играющий роль входной щели прибора. Ввиду того, что излучение не выходит за пределы оптического моноблока, прибор может использоваться при неблагоприятных условиях окружающей среды. Другим преимуществом монолитной схемы является существенное упрощение конструкции из-за отсутствия механических деталей, что с одной стороны упрощает его изготовление, а с другой делает его практически нерасстраиваемым при механических и тепловых воздействиях.

Технические характеристики:

спектральный диапазон, нм.....315–1000;
разрешение при ширине щели 100мкм, нм.....2;
числовая апертура.....0,22;
размер решетки, мм².....40×40.

Несколько образцов прибора изготовлены по заказу НИИ Прецизионного приборостроения, г. Москва.

В п.4.3 сообщается о разработке и изготовлении демультимплексора для спектрального уплотнения каналов волоконно-оптических линий связи, представляющего собой стеклянные моноблоки, с одного конца которых находится вогнутая неклассическая дифракционная решётка, а с другого входные и выходные волокна. Рабочие длины волн десятиканального демультимплексора располагаются через 10 нм, а именно: 1,23; 1,24;...1,32 мкм. Использована оптическая схема близкая к автоколлимационной, т.к. торцы входных и выходных волокон располагаются в ряд, при этом внутренний диаметр волокна составляет 50 мкм, а диаметр оболочки 125 мкм. Специфическим требованием к оптической схеме демультимплексора является

необходимость наличия высокого качества спектрального изображения не только в меридиональной, но и в сагиттальной плоскости. Расчёты показали, что величины aberrаций в меридиональной плоскости составляют 1–2 нм, при этом в сагиттальной плоскости aberrации не превосходят размеров приёмного волокна.

Совместно с ЦНИТИ «Техномаш» (г. Москва) были изготовлены образцы десятиканальных мульти-демультиплексоров, которые показали достаточно малые потери (2–3 дБ) и высокую изолированность соседних каналов (перекрестные помехи) порядка 35–37 дБ.

В п.4.4 сообщается о разработке и изготовлении полихроматора для атомно-эмиссионного анализа. Стремление к созданию компактного высокоразрешающего прибора и необходимость расширения одновременно анализируемого спектрального интервала привела к разработке полихроматора с решёткой радиусом 500 мм, частотой 2400 мм^{-1} , размерами $50 \times 40 \text{ мм}^2$. В приборе использована схема с углом падения $\varphi = 30^\circ$, расстояниями от вершины решётки до входной щели $d = 490,4 \text{ мм}$ и до точки спектрограммы, соответствующей средней длине волны диапазона $d' = 505,5 \text{ мм}$. Фокальная кривая, на которой расположены двенадцать ПЗС - линеек, представляет собой дугу окружности радиусом 263,7 мм с центром, лежащим приблизительно (с точностью $0,5^\circ$) на луче, соответствующему средней длине волны диапазона. В результате величина ОЛД составляет 0,78 нм/мм и разрешающая способность в области 200–450 нм составляет, с учетом параметров системы регистрации, 0,1–0,2 Å. Следует заметить, что светосила прибора в 2 раза больше, а габариты прибора в 2 раза меньше, чем у существующих спектрометров с решёткой, радиусом 1000 мм. Полихроматор разрабатывался для лазерного атомно-эмиссионного спектрометра «ЛАЭС–Спектр» Красногорского завода им. С.А. Зверева.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе работы получены следующие результаты:

1. Разработан и реализован численно-аналитический метод, в котором наряду с оптимизацией всех параметров ВДР, проводится автоматический выбор оптической схемы, включая угол падения излучения на решётку и частоту штрихов.

2. Разработан аналитический метод компенсации дефокусировки с одновременной оптимизацией всех параметров оптической схемы спектрометра с плоским полем при заданном угле падения. Метод может быть реализован без разработки специальных программ.

3. Разработаны методики оптимизации функции зрачка оптической схемы спектрального прибора с вогнутой решёткой.

4. На базе разработанных методов систематически исследованы различные схемы спектральных приборов с плоским и круговым полем изображения. Установлена возможность получения оптимальных схем при заданной дисперсии и входной апертуре прибора.

5. Предложены многоцелевые вертикальные схемы спектрометра, состоящие из набора источников и приёмников излучения, показано преимущество таких схем.

6. Разработаны оптические системы приборов, которые совместно с разными предприятиями были изготовлены и испытаны, а именно: малогабаритный спектрометр с использованием классической решётки в вертикальной схеме, монолитный спектрометр для работы при неблагоприятных воздействиях окружающей среды; десятиканальный монолитный мульти-демультиплексор для волоконно-оптических сетей связи и полихроматор для атомно-эмиссионного спектрометра высокого разрешения.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бажанов Ю.В., Яковлев М.Я., Костенко К.Н., Марков С.Н. Демультимплексоры на основе дифракционных решеток и их предельные характеристики // Оптический журнал. 2006. Т.73. №7. с. 24-28.
2. Даниелян Г.Л., Бажанов Ю.В., Савосин С.В., Марков С.Н. Разработка широкодиапазонного сенсора-мини-спектрометра с волоконным входом для спектрального анализа биологических структур и жидкостей // Оптический журнал. -2007. -Т.74. - №12. с. 55-61.
3. Бажанов Ю.В., Марков С.Н., Костенко К.Н. Разработка и технология изготовления решеточных демультимплексоров // Известия вузов. “Геодезия и аэрофотосъемка”, 2007г., №3, с. 165-173.
4. Даниелян Г.Л., Бажанов Ю.В., Савосин С.В., Марков С.Н. Разработка многоканальных волоконно-оптических жгутов и широкодиапазонного сенсор-мини-спектрометра с волоконным входом для спектрального анализа в биомедицине и геоэкологии // 05 международная научная конференция “Высокие технологии в биологии, медицине и геоэкологии”, труды конференции, Новороссийск, 2007г., с. 30-31.
5. Бажанов Ю.В., Даниелян Г.Л., Марков С.Н. Разработка малогабаритного модульного спектрометра 5II международная конференция «Прикладная оптика», труды конференции, Санкт-Петербург, 2006., с 139-143.
6. Марков С.Н. Мульти/демультимплексоры для волоконно-оптических линий связи 61-я научно-техническая конференция студентов и молодых ученых МИИГАиК, Москва, 2006г.

Подписано в печать 25.02.2009. Гарнитура Таймс
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Объем 1,5 усл. печ. л.
Тираж 80 экз. Заказ №67 Цена договорная

Издательство МИИГАиК
105064, Москва, Гороховский пер., 4