

Захарова Наталья Владимировна

ВОГНУТЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ,
ЗАПИСАННЫЕ В АСТИГМАТИЧЕСКИХ ПУЧКАХ

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 технических наук,
Бездидько С.Н.
кандидат технических наук,
Одинокоев С.Б.

Ведущая организация: ФГУП «Научно-
производственная
корпорация «ГОИ
им. С.И. Вавилова»

Защита состоится «10» июня 2010г. в 10 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 « ____ » _____ 2010г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Климков Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Развитие спектрального приборостроения требует создания светосильных, высокоразрешающих приборов с расширенным спектральным диапазоном. Важным моментом является наличие вогнутой поверхности решётки. Такой оптический элемент выполняет все функции спектрального прибора: коллимацию, дисперсию и фокусировку. Для повышения характеристик прибора необходимо нанести на поверхность решётки штрихи заданной формы и расположения. Существующие методы изготовления нарезных решёток достигли своего предела – в настоящее время можно изготовить решётки с произвольным изменением шага, однако штрихи такой решётки будут концентрическими. Вогнутые голограммные дифракционные решётки (ВГДР) постоянно совершенствуются путём разработки новых схем их записи. Однако, большая часть методов либо нетехнологичны, либо основаны на теории аббераций, требующей уточнения. Существующие методы, свободные от этих недостатков, не могут быть полноценно использованы, т.к. нахождение параметров записи сводится к многомерной задаче оптимизации, результаты которой зависят от начальных условий и не гарантируют наилучшего решения.

Успешное применение новой элементной базы невозможно без развития теории формирования спектрального изображения с помощью ВГДР, создания методов расчета и оптимизации их абберационных характеристик, исследования возможностей и модернизации методов изготовления дифракционных решеток, а также разработки спектральных приборов, максимально полно реализующих преимущества ВГДР. Решению этих вопросов посвящена настоящая работа.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей работы является создание универсального метода расчета характеристик и оптимизации параметров схемы записи ВГДР и разработка на их основе спектральных оптических систем приборов и устройств с повышенными оптическими и эксплуатационными характеристиками.

Для достижения указанной цели требовалось решить следующие задачи:

1. Исследовать и уточнить теорию аберраций ВГДР на основе формул точного расчета хода лучей до третьего порядка включительно.

2. Разработать методы расчета и оптимизации параметров записи ВГДР, обладающих наилучшими характеристиками качества.

3. Рассчитать новые оптические схемы с максимальным использованием преимуществ, даваемых ВГДР, рассчитанными по разработанной методике.

Объект исследования

Объектом исследования являются спектральные приборы с ВГДР и схемы записи ВГДР.

Методика исследования

Рассмотрение вопросов в диссертации основано на анализе литературных данных, выполнении теоретических исследований и проверке достоверности результатов по данным численно-аналитического моделирования.

Научная новизна работы

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

1. Уточнена и доработана теория аберраций ВГДР, основанная на разложении в ряд соотношений, полученных с помощью точного расчёта хода лучей через решётку, записанную с помощью астигматических пучков лучей.

2. Предложены новые оптические схемы записи ВГДР с использованием дополнительного цилиндрического зеркала, которые позволяют исправить аберрации 1-3го порядков спектрального прибора.

3. Показано, что в оптической схеме спектрального прибора с использованием ВГДР, записанной в астигматических пучках, и цилиндрического зеркала аберрации 1-3-го порядков могут быть исправлены.

4. Разработаны методики расчёта параметров схемы записи ВГДР с использованием дополнительного цилиндрического зеркала, образующая которого расположена в меридиональной или сагиттальной плоскости.

5. Разработан численно-аналитический метод оптимизации параметров оптической схемы спектрального прибора на основе ВГДР, записанных астигматическими пучками лучей.

6. Проведено исследование зависимости разрешающей способности от ширины рабочей области спектра и светосилы спектрального прибора с ВГДР, записанных предлагаемым способом.

7. Проведен систематический анализ возможности реализации предлагаемых ВГДР в спектральных приборах во всём оптическом диапазоне.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в:

1. Программной реализации численно-аналитического метода оптимизации параметров оптической схемы спектрального прибора с ВГДР, записанной с использованием дополнительного цилиндрического зеркала.

2. Рекомендациях по выбору оптимальных схем спектрального прибора в зависимости от требований к его рабочей спектральной области, светосиле и разрешающей способности.

3. Разработке оптических систем спектральных приборов нового поколения, использующих ВГДР, записанных с использованием полученных оптимальных параметров записи. Светосила и/или разрешающая способность таких приборов в 2-10 раз выше по сравнению с ВГДР, записанных в гомоцентрических пучках.

На защиту выносятся:

1. Доработанная теория aberrаций ВГДР, полученная с использованием формул точного расчета хода лучей.

2. Численно – аналитические методы расчета оптимальных параметров записи ВГДР с использованием дополнительных цилиндрических зеркал (горизонтального и вертикального цилиндра), основанные на минимизации оценочной функции с учётом aberrаций 1 – 3-го порядков.

3. Результаты расчётов и анализ оптимальных оптических схем спектрометров с плоским и круговым полями изображения.

Личный вклад автора

Все исследования по методам оптимизации схем спектральных приборов и схем записи ВГДР с использованием дополнительного

цилиндрического зеркала (горизонтального и вертикального) принадлежат автору. Им лично разработаны все алгоритмы и программы и проведён расчёт оптических схем спектральных приборов, содержащих ВГДР, записанных с использованием дополнительных цилиндрических зеркал.

Апробация работы

Основные результаты представлены на трёх международных форумах «Голография ЭКСПО» - 2006, 2007, 2009.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 8 научных работ, из них 5 статей в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК, 3 труда, доложенных на конференциях.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём составляет: 151 страницу машинописного текста, 5 таблиц, 39 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В ***первой главе*** приведены известные соотношения из теории аббераций, основанной на функции оптического пути (ФОП), а также приведён анализ схем записи ВГДР и методов оптимизации их параметров.

В п.1.1 приведена современная теория аббераций ВГДР, основанная на ФОП (см. рис. 1). Пусть φ и φ' - углы падения и дифракции "нулевого" луча, выходящего из точки А в меридиональной плоскости, $d = OA$ и $d' = OA'$ - расстояния от входной щели и плоскости изображения Q до вершины решетки, L'_0 - расстояние от точки B'_0 пересечения главного луча с плоскостью Q до плоскости симметрии xOy , $M(x, y, z)$ - произвольная точка, лежащая на штрихе решетки. Выражение

$$V(y, z) = (BM + MB') - (OA + OA') - k\lambda n(x, y, z) \quad (1)$$

называют функцией оптического пути. Это выражение имеет следующий физический смысл. Изображение точки B щели в некоторой точке B'

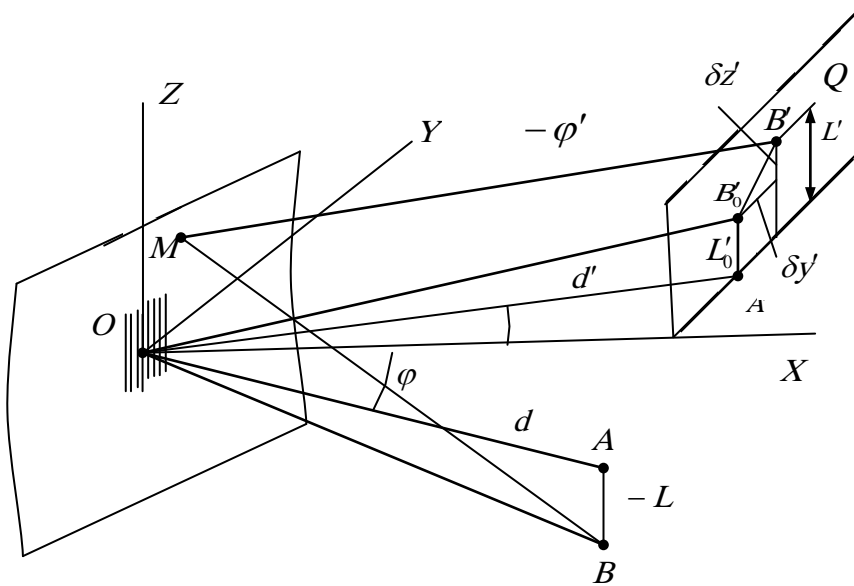


Рисунок 1. К вычислению функции оптического пути

плоскости изображения Q безабберационно, когда $V(y, z) = 0$, то есть когда разность хода луча из точки B , дифрагированного в любой точке $M(y, z)$ на решетке, и "нулевого" луча из точки A в плоскости xOy , дифрагированного в вершине решетки, равна целому числу длин волн. В этом случае изображение, даваемое такой решёткой, называется стигматическим. Число $m(y, z)$ означает количество штрихов на поверхности решетки между ее вершиной O и точкой M .

Выразив расстояния в формуле (1) через координаты и учитывая форму поверхности решётки, после разложения в ряд по координатам на решётке получим:

$$\begin{aligned}
 V(y, z, L'_0) = & (y^2V_{200} + z^2V_{020} + y^3V_{300} + yz^2V_{120} + yL_0^2V_{102})/2 + \\
 & + yzL_0V_{111} + \frac{1}{8}y^4V_{400} + \frac{1}{4}y^2z^2V_{220} + \frac{1}{8}z^4V_{040} + \dots
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Для изучения фокусирующих и абберационных свойств вогнутых дифракционных решеток необходимо последовательно рассмотреть члены разложения ФОП, представленные в формуле (2).

Коэффициент V_{200} характеризует дефокусировку первого порядка в меридиональном сечении, коэффициент V_{020} – дефокусировку первого порядка в сагиттальном сечении, коэффициент V_{300} - меридиональную кому второго порядка, вызываемую лучами, идущими в плоскости симметрии,

коэффициент V_{120} – кому второго порядка, создаваемую лучами, идущими вне плоскости симметрии; коэффициент V_{111} – астигматизм второго порядка, коэффициент V_{102} – искривление спектральных линий, коэффициенты V_{400} и V_{040} – сферическую aberrацию третьего порядка, коэффициент V_{220} – несимметричную сферическую aberrацию третьего порядка.

Используя принцип Ферма, можно получить, что поперечные aberrации в направлении дисперсии ($\delta y'$) и в направлении высоты щели ($\delta z'$) пропорциональны частным производным ФОП по координатам x и y :

$$\delta y' = \frac{d'}{\cos \varphi'} \cdot \frac{\partial V}{\partial y}, \quad \delta z' = d' \frac{\partial V}{\partial z}. \quad (3)$$

Выполняя дифференцирование выражения (3), получим величины поперечных aberrаций второго и третьего порядков:

$$\delta y' = \frac{d'}{\cos \varphi'} \left(\frac{3}{2} y^2 V_{300} + \frac{1}{2} z^2 V_{120} + \frac{1}{2} L_0' V_{102} + z L_0' V_{111} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} y^3 V_{400} + \frac{1}{2} y z^2 V_{220} \right) + \dots \quad (4)$$

$$\delta z' = d' \left(y z V_{120} + y L_0' V_{111} + \frac{1}{2} y^2 z V_{220} + \frac{1}{2} z^3 V_{040} \right) + \dots$$

Коэффициенты aberrаций выражаются как

$$V_{ijk} = M_{ijk} - \frac{k \lambda}{\lambda^*} H_{ijk}, \quad (5)$$

где M_{ijk} – коэффициенты, зависящие от формы поверхности ВГДР и от схемы, в которой она используется; H_{ijk} – голограммные коэффициенты, зависящие от схемы записи ВГДР; k – порядок дифракции; λ – текущая длина волны; λ^* – длина волны записи ВГДР. В разделе приведены выражения для коэффициентов M_{ijk} при различной форме поверхности решетки.

В п.1.2 приведены голограммные коэффициенты H_{ijk} в случае записи точечными источниками излучения (запись в гомоцентрических пучках). Рассмотрены основные способы записи ВГДР, а именно: запись с помощью дополнительных зеркал («решётки второго поколения») и дополнительных дифракционных решёток («решётки третьего поколения»). Указано, что меридиональные плоскости зеркал и решётки должны совпадать, в противном

случае (при наклонном положении зеркал) появляются неустранимые типы aberrаций. Введение в схему записи дифракционных решёток не даёт преимуществ в коррекции aberrаций, т.к. при использовании даже одного дополнительного зеркала при записи решётки имеется достаточное количество параметров оптимизации. Кроме этого, существуют технологические трудности при записи, например, наличие нескольких порядков спектра, разная интенсивность интерферирующих пучков и т. д. Существующие двухступенчатые методы, когда дополнительная решётка записывается в определённой схеме, затем после проявления и алюминирования должна с высокой точностью устанавливаться на прежнее место, нетехнологичны, ввиду трудностей такой установки. Методы записи дифракционных решёток во встречных пучках с целью получения высокой дифракционной эффективности трудоёмки, требуют высококачественной обработки задней стороны решётки, приводят к повышению рассеянного света и могут быть с успехом заменены ионным травлением рабочей поверхности решётки.

Таким образом, анализ существующих методов показывает, что наиболее перспективным является использование дополнительных зеркал, нормали к вершинам которых лежат в меридиональной плоскости.

В п.1.3 рассмотрены основные критерии, применяемые для оценки спектрального изображения и существующие методы оптимизации параметров ВГДР. Как видно из обзора, существует большое количество подходов для получения оптимальных параметров, различающихся методами вычислений и выбором оценочной функции.

На наш взгляд наиболее приемлемым является метод расчета, в котором параметры решетки определяются с помощью аналитической оптимизации оценочной функции максимально полно описывающих работу спектрального прибора с последующим контролем полученного решения с помощью расчёта аппаратных функций спектрального прибора. Метод состоит из трех этапов.

На первом этапе используются формулы для оптимальных параметров вогнутой решетки при минимизации дефокусировки и астигматизма 1-го порядка.

На втором этапе аналитическими методами проводится компенсация aberrаций 2-го и 3-го порядков с использованием в качестве оценочных функций хорошо известных критериев качества изображения – усредненного по зрачку системы квадрата поперечной aberrации $\delta y'$

$$Q_1 = \frac{1}{\bar{\tau}} \iint_S \delta y'^2 dS, \quad (6)$$

и функции передачи модуляции (ФПМ), которая в области низких пространственных частот может быть записана в виде:

$$Q_2 = \frac{1}{\bar{\tau}} \iint_S \delta y'^2 dS - \left(\frac{1}{\bar{\tau}} \iint_S \delta y' dS \right)^2, \quad (7)$$

где

$$\bar{\tau} = \frac{1}{S} \iint_S \tau dS, \quad (8)$$

а S и τ – соответственно заштрихованная площадь дифракционной решетки и ее функция пропускания. На третьем этапе производится расчёт АФ спектральных приборов.

В настоящей работе для оптимизации параметров ВГДР используются программы, основанные на приведённом методе, разработанные с участием автора работы и описанные в последующих главах.

Во *второй главе* рассматривается теория aberrаций, основанная на методах, использующих формулы расчета хода луча, поскольку именно этот метод даёт наиболее точные результаты. Меньшую точность дают аналитические выражения для поперечных aberrаций, полученные на основании принципа Ферма, откуда находятся заранее неизвестные значения коэффициентов aberrаций.

Действительно, при выводе коэффициентов aberrаций с помощью ФОП предполагается, что изображение точечного источника представляет собой идеальную точку, в действительности же - это пятно конечных размеров. В результате, способ нахождения aberrаций через производные ФОП применим лишь в случае малых aberrаций. В работе рассмотрен метод, основанный на формулах расчёта хода луча как при работе спектрального прибора (воспроизведении ВГДР), так и при изготовлении решётки (записи ВГДР). Вывод этих соотношений достаточно трудоёмок, а окончательные выражения

довольно громоздки. Ввиду того, что в них неоднократно вносились исправления, автору настоящей работы пришлось провести независимые расчёты, которые подтвердили и уточнили эти соотношения.

В п.2.1 представлены выражения для поперечных аберраций 1-3-го порядков, которые имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \delta y' &= \frac{d'}{\cos \varphi'} \left\{ y V_{200} + y^2 \left(\frac{3}{2} V_{300} - 2 V_{200} \frac{\sin \varphi'}{d'} \right) + z^2 \left(\frac{1}{2} V_{120} - V_{020} \frac{\sin \varphi'}{d'} \right) + \right. \\
 &+ y^3 \left[V_{400} - 3 V_{300} \frac{\sin \varphi'}{d'} + V_{200} \left(\frac{\sin^2 \varphi'}{d'^2} + \frac{\sec \varphi' - 2 \cos \varphi'}{2 r d'} \right) \right] + \\
 &+ y z^2 \left[\frac{1}{2} V_{220} - 2 V_{120} \frac{\sin \varphi'}{d'} + \frac{1}{2} V_{200} \left(\frac{\sec \varphi' - 2 \cos \varphi'}{r d'} \right) + V_{020} \frac{\sin^2 \varphi'}{d'^2} \right] + \dots \left. \right\} \\
 \delta z' &= d' \left\{ z V_{020} + y z \left(V_{120} - V_{020} \frac{\sin \varphi'}{d'} \right) + y^2 z \left(\frac{1}{2} V_{220} - V_{120} \frac{\sin \varphi'}{d'} - \right. \right. \\
 &\left. \left. - \frac{1}{2} V_{020} \frac{\cos \varphi'}{r d'} \right) + \frac{1}{2} z^3 \left(V_{040} - V_{020} \frac{\cos \varphi'}{r d'} \right) + \dots \right\},
 \end{aligned} \tag{9}$$

где коэффициенты V_{ijk} не отличаются от соответствующих коэффициентов, полученных с помощью ФОП.

Как видим из формул (9), коэффициенты аберраций первого порядка V_{200} и V_{020} входят в выражения для меридиональной и сагиттальной комы 2-го порядка, а коэффициенты аберраций второго порядка V_{300} и V_{120} вместе с коэффициентами 1-го порядка входят в выражения для сферической аберрации 3-го порядка. Таким образом, при отсутствии дефокусировки и астигматизма 1-го порядка величины меридиональной и сагиттальной комы не отличаются от величин, полученных с помощью разложения в ряд ФОП, а если к тому же, меридиональная и сагиттальная кома равны нулю, то и сферическая аберрация 3-го порядка не отличается от полученной с помощью ФОП.

Ещё до появления этой теории И.В. Пейсахсоном (ГОИ) было показано, что расчет аберраций по формулам, полученным из ФОП, не совпадает с данными точного расчета хода лучей. Им эмпирически были получены соотношения для сагиттальной комы 2-го порядка в зависимости от астигматизма 1-го порядка.

В настоящей работе, исходя из формул (9), были получены выражения для коэффициентов M_{ijk} для аберраций 1-2-го порядков в виде:

$$T'_y = \frac{\cos^2 \varphi' (1+a)}{d'} - \frac{\cos \varphi'}{r}; \quad S'_y = \frac{(1-K)^2}{d'} - \frac{\cos \varphi'}{r} \quad (10)$$

при вычислении aberrации $\delta y'$ и

$$S'_z = \frac{1-K+b}{d'} - \frac{\cos \varphi'}{r}, \quad (11)$$

при вычислении aberrации $\delta z'$,

где U и K – коэффициенты дефокусировки и астигматизма 1-го порядка, а

$$a = \frac{d'(U^2 - 2Uc)}{3 \cos^2 \varphi'}; \quad b = \frac{d'U}{r}; \quad c = \frac{1}{r} - \frac{2 \cos \varphi'}{d'}. \quad (12)$$

При $U = 0$ выражения для aberrаций 2-го порядка совпадают с формулами Пейсахсона. При $U = K = 0$ формулы (9) и (10) совпадают с формулами, полученными из ФОП. Эти расчёты являются проверкой соотношений (9) в области aberrаций 1 и 2-го порядков.

Таким образом, приближенный подход к определению поперечных aberrаций, основанный на ФОП, справедлив лишь при небольших значениях дефокусировки и астигматизма 1-го порядка.

В п.2.2 приведена теория aberrаций при записи эллипсоидальной ВГДР с помощью двух дополнительных эллипсоидальных зеркал (см. рис. 2).

Обозначим углы падения лучей от источников записи на вершину решетки как i_1 и i_2 , углы падения и отражения на зеркала η_1 и η_2 , расстояния от источников записи O_1 и O_2 до вершин зеркал соответственно p_1 и p_2 , а расстояния от вершин зеркал до вершины решетки соответственно q_1 и q_2 . Точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$ и $M(x, y, z)$ – произвольные точки поверхности зеркал и заготовки решетки соответственно. Между параметрами записи справедливы соотношения:

$$d_1 = q_1 + \left(\frac{1}{p_1} - \frac{2}{r_1} \sec \eta_1 \right)^{-1} \quad (13)$$

$$\bar{d}_1 = q_1 + \left(\frac{1}{p_1} - \frac{2}{\bar{r}_1} \cos \eta_1 \right)^{-1},$$

где r_1 и \bar{r}_1 – радиусы кривизны во взаимно перпендикулярных сечениях, при этом $r_1 = b_1^2/a_1$, и $\bar{r}_1 = c_1^2/a_1$, a_1, b_1, c_1 – полуоси эллипса первого дополнительного зеркала. Для второго зеркала выражения будут аналогичными. Голограммные коэффициенты aberrаций H_{ijk} имеют весьма сложный вид, поэтому здесь приведены лишь функциональные зависимости

от параметров записи, являющихся независимыми:

$$\begin{aligned}
 H_{100} &= H_{100}(i_1, i_2) \\
 H_{200} &= H_{200}(i_1, i_2, d_1, d_2) \\
 H_{020} &= H_{020}(i_1, i_2, \bar{d}_1, \bar{d}_2) \\
 H_{300} &= H_{300}(i_1, i_2, d_1, d_2, r_1, r_2, \eta_1, \eta_2) \\
 H_{120} &= H_{120}(i_1, i_2, d_1, d_2, \bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{r}_1, \bar{r}_2, \eta_1, \eta_2) \\
 H_{400} &= H_{400}(i_1, i_2, d_1, d_2, r_1, r_2, \eta_1, \eta_2) \\
 H_{220} &= H_{220}(i_1, i_2, d_1, d_2, \bar{d}_1, \bar{d}_2, r_1, r_2, \bar{r}_1, \bar{r}_2, \eta_1, \eta_2) \\
 H_{040} &= H_{040}(i_1, i_2, d_1, d_2, \bar{d}_1, \bar{d}_2, r_1, r_2, \bar{r}_1, \bar{r}_2, \eta_1, \eta_2, a_1, a_2).
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

В соотношения (14) не входят расстояния p_1 , p_2 , q_1 и q_2 , т.к. они связаны с расстояниями d , d' , \bar{d} и \bar{d}' соотношениями типа (13).

В общем случае имеем 14 независимых параметров, однако для выполнения основного уравнения решётки необходимо иметь фиксированную величину H_{100} , в результате независимых параметров остаётся 13, а корректируемых aberrаций 1-3 го порядков – 7, т.е. имеем недоопределённую систему, когда число уравнений меньше числа неизвестных. В случае, когда в схеме присутствует только одно эллипсоидальное зеркало, выражения (14) упрощаются, а именно, $d_2 = \bar{d}_2$, $r_2 = \bar{r}_2 = a_2 = \infty$ и из выражений исчезают члены, зависящие от параметра η_2 , поэтому для одного эллипсоидального зеркала остаётся 7 коррекционных параметров. Казалось бы, число уравнений равно числу неизвестных, однако, в выражения, определяющие aberrации

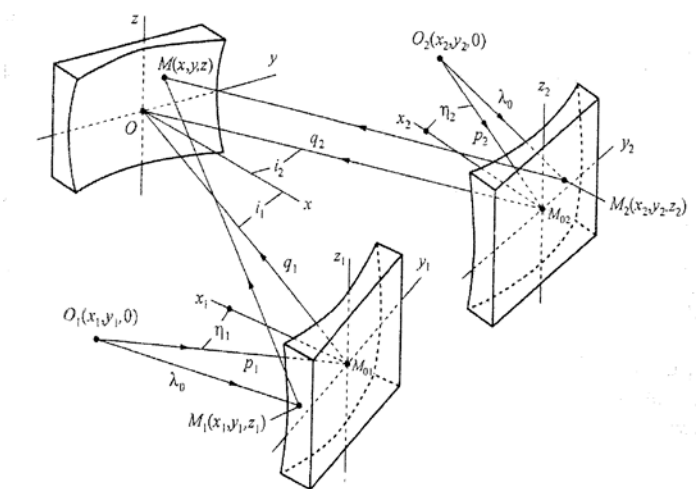


Рисунок 2. Запись ВГДР в астигматических пучках

2–го и 3–го порядков входят нелинейные и очень громоздкие дополнительные слагаемые, которые не позволяют получить искомые параметры аналитическим способом.

В п.2.3 рассмотрены частные случаи схем записи с использованием дополнительных одного или двух тороидальных, сферических и цилиндрических зеркал. Оказалось, что при использовании в схеме записи только одного цилиндрического зеркала имеется 6 коррекционных параметров. Этого вполне достаточно для исправления 6 видов aberrаций (aberrации, определяемые коэффициентом H_{040} , влияют лишь на составляющую в направлении щели спектрального прибора и ими можно пренебречь). Причём такое цилиндрическое зеркало может быть двух видов:

- образующая лежит в меридиональной плоскости (горизонтальный цилиндр);
- образующая лежит в плоскости штрихов (вертикальный цилиндр).

В *третьей главе* рассмотрены методики оптимизации параметров ВГДР, записанных с использованием двух видов цилиндрических зеркал – горизонтального и вертикального.

В п.3.1 рассмотрены методики нахождения оптимальных голограммных коэффициентов и оптимальных схем спектрометров с плоским и круговым полем изображения и спектрометров на круге Роуланда.

На первом этапе рассмотрены методы определения оптимальных голограммных коэффициентов 1–го порядка – дефокусировки H_{200} и астигматизма 1–го порядка H_{020} на основе выражения вида

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_{ijk} \frac{\partial V_{ijk}}{\partial \alpha} d\lambda = 0, \quad (15)$$

где $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ – рабочая область длин волн, а α – параметр, по которому ведется минимизация. Эти методики реализованы для схем спектрометров с плоским и круговым полем изображения, а также - на круге Роуланда.

На втором этапе приведены методики нахождения оптимальных голограммных коэффициентов 2–го и 3–го порядков – H_{300} , H_{120} , H_{400} и H_{220} . Эти методики реализованы на основании минимизации оценочных функций. При расчетах используется критерий в виде величины, выражающей

усреднённую по зрачку системы сумму квадратов aberrаций в главных сечениях. В случае спектральных приборов с ВГДР, как правило, сагиттальная составляющая aberrаций значительно превосходит меридиональную, поэтому нами в качестве оценочной функции Q_1 используется выражение усредненного по поверхности решетки квадрата aberrации $\delta u'$ (6). Другим критерием, используемым нами для оптимизации, является функция Q_2 передачи модуляции (7).

Оценочные функции Q_1 и Q_2 справедливы лишь для одного значения длины волны, однако, их аналитическое интегрирование по спектральной области, как это было в случае дефокусировки и астигматизма 1-го порядка, не представляется возможным. Ввиду этого данная функция вычисляется как сумма функций для отдельных длин волн

$$\tilde{Q} = \sum \delta_i Q_i(\lambda_i) , \quad (16)$$

где величина δ_i используется как весовой множитель для перераспределения требований к оптимизации в зависимости от длины волны.

Для нахождения оптимальных коэффициентов aberrаций H_{ijk} необходимо решить систему уравнений

$$\frac{\delta Q}{\delta H_{ijk}} = 0, \quad (17)$$

где $i, j, k = 300, 120, 400, 220$.

Следующим этапом расчета оптимальных параметров является нахождение такой схемы записи, параметры которой однозначно могут быть выражены через найденные в процессе оптимизации коэффициенты H_{ijk} .

В п.3.2 приведена методика оптимизации параметров записи ВГДР с использованием дополнительного горизонтального цилиндра. Приведены выражения для коэффициентов aberrаций H_{ijk} ВГДР с использованием горизонтального цилиндра. Зная параметры схемы прибора, для получения оптимальных параметров записи необходимо решить относительно расстояний d_1 и d_2 систему уравнений, в которую входят коэффициенты H_{200} и H_{300} . Решение выразится в виде корней квадратного уравнения, подставляя которые в выражение для H_{400} и варьируя одним из углов записи, получаем значения d_1, d_2, i_1 и i_2 . Значение параметра \bar{d}_1 найдем из выражения для H_{020} .

Параметры p_1 и q_1 связаны через \bar{r}_1 и η_1 . Решая систему уравнений H_{120} и H_{220} путем варьирования \bar{r}_1 и η_1 , получаем минимальные значения H_{120} и H_{220} .

В п.3.3 приведена методика нахождения оптимальных параметров записи ВГДР с использованием вертикального цилиндра. Приведены выражения для голограммных коэффициентов H_{ijk} при использовании вертикального цилиндра. Для получения оптимальных параметров записи ВГДР необходимо решить относительно расстояний d_1 и d_2 систему двух уравнений, в которую входят коэффициенты H_{200} и H_{120} . Решение выразится в виде корней квадратного уравнения, которые зависят от углов i_1 и i_2 . Значение параметра \bar{d}_1 найдем из уравнения для коэффициента H_{020} . Т.к. коэффициенты H_{300} , H_{400} и H_{220} зависят также и от параметров r_1 и η_1 , то для нахождения оптимальных параметров будем варьировать значениями i_1 , r_1 и η_1 и найдем минимальные значения для коэффициентов аберраций, включающих H_{300} , H_{400} и H_{220} .

В п.3.4 рассмотрен случай, когда оптическая схема спектрального прибора представляет собой цилиндрическое зеркало и ВГДР, записанную с помощью точечных источников. Задача упрощается ввиду того, что выражения частей ФОП, зависящих от схемы прибора и схемы записи, отличаются лишь знаками между ветвями схемы: при записи находится разность оптических путей до когерентных источников, а при воспроизведении - сумма расстояний до источника излучения и его спектрального изображения. Нетрудно предположить, что вид коэффициентов аберраций для схемы работы прибора с использованием цилиндрического зеркала между входной щелью и решёткой можно получить, взяв коэффициенты для схемы записи с использованием цилиндрического зеркала, и заменить знаки и соответствующие величины, определяющие положения элементов схемы записи на величины, определяющие положения элементов схемы прибора.

При заданной схеме прибора присутствует 6 коррекционных параметров: d_1 , d_2 , $i_1(i_2)$, \bar{d} , η , \bar{r}_1 . С помощью этих параметров можно исправить 6 аберраций. Т.к. при использовании в схеме прибора

горизонтального цилиндра выражения для коэффициентов aberrаций V_{200} , V_{300} и V_{400} не отличается от схем с одиночной решёткой (без зеркала), следовательно, величины d' , H_{200} , H_{300} и H_{400} , а также параметры записи d_1 , d_2 , i_1 и i_2 найдутся тем же способом, что и для одиночной решётки. На этом параметры записи закончились, и остальные голограммные коэффициенты H_{ijk} так же известны. Оптимизация коэффициентов aberrаций V_{020} , V_{120} и V_{220} будет выполняться по параметрам схемы спектрального прибора, входящими в коэффициенты M_{020} , M_{120} и M_{220} .

Подставляя найденные значения параметров записи в выражение для H_{020} , получаем его величину, а затем из условия $V_{020} = 0$ находим выражение для величины \bar{d} , в которое входят величины, определяющие радиус и расположение цилиндрического зеркала, используемого в схеме работы прибора. Варьируя параметрами \bar{r}_1 и η в выражениях для M_{120} и M_{220} , находим оптимальные значения этих параметров,

Изготовление решёток с дополнительными оптическими элементами представляет собой более сложную задачу, одной из трудностей является их юстировка в схеме записи. Напротив, юстировка дополнительного оптического элемента в схеме прибора не представляет таких сложностей, т.к. может контролироваться приёмником излучения.

В п.3.5 описана реализация на персональном компьютере разработанных методик расчета оптимальных параметров записи ВГДР. Методы компенсации aberrаций 1-3-го порядков и методика автоматического выбора оптической схемы записи ВГДР программно интегрированы и реализованы на персональном компьютере. В работе приведены две блок – схемы программы и их краткое описание.

Проведен анализ на максимальный угол падения на заготовку решетки в зависимости от радиуса решетки и засвечиваемой области. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения максимально допустимого угла записи ВГДР

y/r	1/10			1/7			1/5			1/3		
d_1/r	2	1	0,5	2	2	0,5	2	1	0,5	2	1	0,5
i	78,9	79,3	80,1	74,4	75,3	77,0	68,7	70,3	73,7	55,8	60,5	70,1

В таблице 1: y/r – светосила решетки; d_1/r – несимметричность схемы прибора, i – угол падения на ВГДР (допустимый угол записи).

В *четвёртой главе* приводятся результаты расчетов различных схем спектрометров, использующих ВГДР, записанные с использованием дополнительного цилиндрического зеркала как горизонтального, так и вертикального. Проведён анализ возможности использования предлагаемых типов ВГДР в схемах спектральных приборов во всём оптическом диапазоне спектра от мягкого рентгеновского до инфракрасного излучения.

В п.4.1 приводятся результаты расчетов схем спектрометров нормального падения. В качестве базовой использована оптическая схема спектрометра для ближней ультрафиолетовой области спектра - «ЛАЭС-спектр» (ОАО «Красногорский завод им.С.А.Зверева»):

- рабочий спектральный диапазон - 180 - 400 нм,
- частота штрихов решётки - $N=2400$ штр/мм,
- радиус кривизны решётки - $r = 501,2$ мм,
- размеры решётки - $2Y \times 2Z = 50 \times 40$ мм²,
- угол падения излучения на решётку - $\varphi = 30^\circ$,
- расстояние от входной щели до решётки - $d = 493,7$ мм,
- ширине входной щели - 0,0075мм,
- длина волны записи - $\lambda^* = 441,6$ мкм.

В таблице 2 приведены результаты расчёта схемы записи с использованием ВГДР, записанной классическим способом (*схема 1*), с помощью горизонтального цилиндра (*схема 2*) и с помощью вертикального цилиндра (*схема 3*).

Таблица 2. Схемы записи ВГДР в базовой схеме (рабочий спектральный диапазон - 180 - 400 нм)

	d_1	d_2	\bar{d}_1	i_1	i_2	p_1	q_1	$\bar{r}_1 (r)$	η_1
Схема 1	670,91	555,18	-	56,66	-12,97	-	-	-	-
Схема 2	344,083	440,871	501,35	55,98	-13,37	218,70	125,37	1005,12	16,02
Схема 3	405,82	490,37	653,65	63,0	-9,72	143,4	510,25	172,12	-45,4

Результаты расчета полуширины АФ приведены в таблице 3. Как видим из расчётов, наилучшие результаты даёт использование при записи вертикального цилиндра. В этом случае для размера решётки 50×40 мм²

среднее по спектральной области разрешение в 3 раза выше по отношению к классической решетке.

Таблица 3. Значение полуширины АФ (мкм) спектрометра нормального падения в спектральной области 180 - 400 нм

λ , нм	180	202	224	246	268	290	312	334	356	378	400
Схема 1	30,73	20,69	15,19	14,68	14,02	13,86	13,78	13,87	14,02	13,91	11,53
Схема 2	17,10	13,87	8,55	8,00	7,60	9,00	10,45	9,90	8,93	8,36	9,12
Схема 3	8,28	8,53	8,77	8,95	9,03	9,03	9,10	9,19	9,22	9,32	9,32

Известно, что спектральная линия может быть разрешена, если она укладывается, по крайней мере, в три пиксела на приёмнике излучения. Зависимость полуширины АФ от апертуры решётки показывает (рис. 3), что при использовании приёмника с шириной пиксела 8 мкм полуширина АФ размером 24 мкм достигается у решётки, записанной классическим способом, уже при заданных размерах ($50 \times 40 \text{ мм}^2$), а использование вертикального цилиндра позволяет увеличить площадь решётки до $160 \times 160 \text{ мм}^2$. Это означает увеличение светосилы прибора более чем в 10 раз. Следует заметить, что на графиках ось ординат обозначена как «площадь», что означает размер стороны квадрата заштрихованной части решётки.

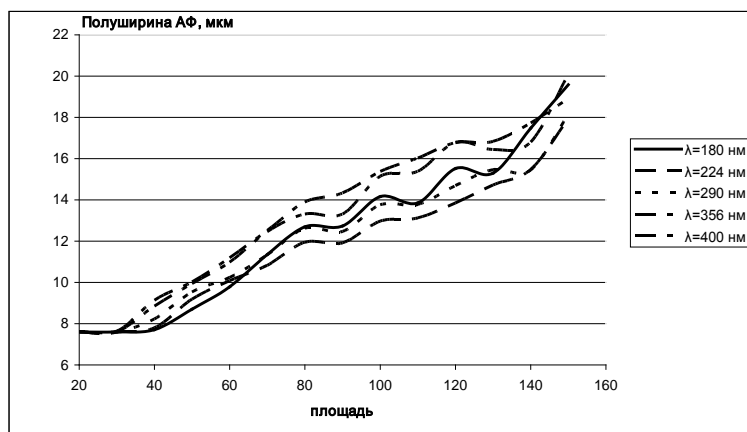


Рисунок 3. Зависимость полуширины АФ спектрометра от апертуры решетки с ВГДР, записанной при помощи вертикального цилиндра.

С помощью рис.3 оценка полуширины АФ для более широких щелей спектрального прибора может быть выполнена прибавлением к вычисленной полуширине АФ величины, равной разности первоначальной и новой ширины щели. Например, при ширине входной щели равной 0,03мм полуширина АФ, соответствующая минимальной разрешаемой полуширине

24 мкм для линейки с размером 8 мкм, будет равна 0,0465мм, что приблизительно соответствует величине утроенной ширины пиксела размером 14 мкм. Линейки с таким размером пикселей являются в настоящее время наиболее распространёнными при использовании в спектральных приборах. Максимальные размеры решёток с предельным разрешением при записи с помощью горизонтального и вертикального цилиндров при ширине входной щели равной 0,03мм приблизительно соответствуют величинам при ширине входной щели равной 7,5 мкм.

Обратная линейная дисперсия $d\lambda/dl$ в этой схеме прибора равна приблизительно 0,8 нм/мм. При использовании линейки с пикселями размером 8 мкм имеем предел разрешения $\delta\lambda = 0,8 \text{ нм/мм} \times 0,024 \text{ мм} = 0,019 \text{ нм}$, а предел разрешающей способности для средней длины спектрального диапазона 290 нм составляет $R = \lambda/\delta\lambda = 15263$. При использовании линейки с пикселями размером 14 мкм соответственно имеем $\delta\lambda = 0,034 \text{ нм}$, а $R = 8529$.

В этой же схеме рассмотрены варианты приборов, у которых произведение λN - величина постоянная, а именно:

- *Спектрометр для видимой области спектра: $N = 1200$ штр/мм, $\Delta\lambda = 360 - 800$ нм,*
- *Спектрометр для ближней инфракрасной области спектра: $N = 600$ штр/мм, $\Delta\lambda = 720 - 1600$ нм.*

Также рассмотрены схемы:

- *Спектрометр для ближней ультрафиолетовой и видимой областей спектра, предназначенный для работы во всей области чувствительности ПЗС приёмников оптического излучения, а именно: $\lambda_1 = 200$ нм, $\lambda_2 = 900$ нм, $N = 1200$ штр/мм, $r = 501,2$ мм, $2Y \times 2Z = 50 \times 40$ мм², $\varphi = 35^\circ$, $d = 460,713$ мм.*
- *Спектрометр для дальней ультрафиолетовой области спектра, для работы в вакуумной области: $\lambda_1 = 90$ нм, $\lambda_2 = 200$ нм, $N = 3600$ штр/мм, $r = 501,2$ мм, $2Y \times 2Z = 50 \times 40$ мм², $\varphi = 30^\circ$, $d = 464,713$ мм.*

Для этих случаев приведены схемы спектрометров с ВГДР и рассчитаны оптимальные схемы записи ВГДР с использованием классического способа, а также при помощи горизонтального и

вертикального цилиндров. Рассмотрены полуширины АФ для всех случаев и дан краткий анализ.

Показано, что использование предлагаемых ВГДР в спектрометрах нормального падения позволяет значительно (в 5 – 10 раз) увеличить светосилу прибора при сохранении максимальной разрешающей способности, обеспечиваемой современными приёмниками излучения.

В п.4.2 приведены аналогичные расчёты и анализ автоколлимационных схем спектрометров, в которых применяются ВГДР, записанные классическим способом, с помощью горизонтального цилиндра и с помощью вертикального цилиндра. Показано, что автоколлимационные схемы не дают преимущества по сравнению с обычными схемами нормального падения, однако их применение целесообразно в приборах для дальней ультрафиолетовой области для уменьшения вакуумированного объёма прибора.

В п.4.3 рассмотрены схемы спектрометров скользящего падения для использования в мягкой рентгеновской и дальней ультрафиолетовой областях спектра. Оптимальный угол отклонения выбирается из условия получения максимально высокого качества изображения по рабочей спектральной области, а также из иных соображений, касающихся габаритных характеристик и условий эксплуатации прибора. При скользящих углах падения и дифракции аберрации решетки и, в первую очередь, дефокусировка и астигматизм 1-го порядка, становятся большими. Схема спектрометра скользящего падения имеет следующие параметры: $\lambda_1 = 40 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 123 \text{ нм}$, $N=690 \text{ штр/мм}$, используется тороидальная решетка $r = 6456 \text{ мм}$, $\bar{r} = 335,77656 \text{ мм}$, $2Y \times 2Z = 130 \times 25 \text{ мм}^2$, $\varphi = 77^\circ$, $d = 1378,4351 \text{ мм}$.

Применяя выше описанную методику нахождения оптимальных параметров записи ВГДР, получаем классическую (схема 1) и оптимальную схему записи ВГДР, полученную с помощью вертикального цилиндра (схема 2). Параметры схемы записи приведены в таблице 4.

Таблица 4. Схемы записи решёток спектрометра скользящего падения

	d_1	d_2	\bar{d}_1	i_1	i_2	p_1	q_1	r	η_1
Схема 1	1271,97	1284,46	-	-44,05	-89,94	-	-	-	-
Схема 2	723,9	269,09	352,54	-39,0	-69,07	131,56	220,98	645,6	-56,5

Результаты расчета полуширины АФ приведены в таблице 5.

Таблица 5. Значение полуширины АФ спектрометра скользящего падения

λ , нм	40,0	48,3	56,6	64,9	73,2	81,5	89,8	98,1	106,1	114,7	123,0
Схема 1	79,86	79,04	78,85	79,43	80,24	81,87	82,94	83,87	85,52	85,98	86,79
Схема 2	37,22	37,88	39,82	39,89	41,53	43,92	44,22	46,75	47,25	49,33	55,64

Аналогичные результаты могут быть получены в этой же схеме при:

- $N=1380$ *штп/мм*, $\lambda_1 = 20$ нм, $\lambda_2 = 62$ нм,
- $N=2760$ *штп/мм*, $\lambda_1 = 10$ нм, $\lambda_2 = 31$ нм.

Расчёты показывают, что в данной схеме скользящего падения использование предлагаемых ВГДР позволяет повысить разрешающую способность приблизительно в два раза. Использование предлагаемых ВГДР необходимо также в виду невозможности изготовления решёток высокого разрешения другим способом.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе работы получены следующие результаты:

1. Уточнена и дополнена теория aberrаций ВГДР, основанная на разложении в ряд соотношений, полученных с помощью точного расчёта хода лучей через решётку, записанную с помощью дополнительных оптических элементов.

2. Предложены оптимальные оптические схемы записи ВГДР с использованием дополнительного цилиндрического зеркала, образующая которого расположена в меридиональной или сагиттальной плоскости.

3. Показано, что в оптической схеме спектрального прибора с использованием ВГДР, записанной в гомоцентрических пучках, и цилиндрического зеркала aberrации 1-3-го порядка могут быть исправлены.

4. Разработаны и реализованы методики расчёта оптимальных параметров схемы записи ВГДР с использованием дополнительного цилиндрического зеркала на основе оптимизации коэффициентов aberrаций до 3-го порядка включительно.

5. Исследована зависимость разрешающей способности от ширины рабочей области спектра и светосилы спектрального прибора с ВГДР,

записанных предлагаемым способом, и даны рекомендации по выбору оптимальных схем спектральных приборов.

б. Предложены варианты использования разработанных типов ВГДР в различных схемах спектральных приборов. Светосила и/или разрешающая способность таких приборов в 2-10 раз выше по сравнению с ВГДР, записанных в гомоцентрических пучках.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Малышева Н.В. Основные типы вогнутых голограммных дифракционных решеток // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2007. - №4. – С.146 – 154.
2. Бажанов Ю.В., Захарова Н.В. Методы расчета оптической схемы записи голограммной дифракционной решетки с использованием цилиндрического зеркала // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2009. - №5. – С.98 – 100.
3. Бажанов Ю.В., Захарова Н.В. Вогнутые дифракционные решетки в астигматических пучках // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2009. - №6. – С.72 – 74.
4. Бажанов Ю.В., Захарова Н.В. Численно – аналитический метод оптимизации оптических систем с вогнутыми голограммными дифракционными решетками // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. - №12, том 14. – С.52 – 57.
5. Бажанов Ю.В., Захарова Н.В. К теории аббераций астигматических пучков вогнутой дифракционной решетки // Оптический журнал. – 2010. - №4. – С. 17-18.
6. Бажанов Ю.В., Малышева Н.В. Анализ абберационных свойств вогнутых голограммных решеток // Третий Международный Форум «Голография Экспо – 2006», официальные материалы конференции, Москва. – 2006. – С.60.
7. Бажанов Ю.В., Малышева Н.В. Оптические системы записи голограммных дифракционных решеток с использованием тороидальных зеркал // Четвертый Международный Форум «Голография Экспо – 2007», сборник трудов конференции, Москва. – 2007. – С.80 - 81.

8. Бажанов Ю.В., Захарова Н.В. Коррекция аберраций голограммных решеток, записанных с помощью цилиндрической оптики // Шестой Международный Форум «Голография Экспо – 2009», сборник трудов конференции, Киев. – 2009. – С.134.