

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ИНСТИТУТ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

На правах рукописи

УДК 535.31

С.А. РОДИОНОВ

**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И
МЕТОДОВ ИХ РАСЧЕТА НА ЦВМ**

Специальность 05.258 — Оптические приборы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Город ЛЕНИНГРАД – год 1971

За последние годы техническая оптика как наука о методах расчета и оценки изображения оптических систем претерпела значительный качественный скачок в своем развитии. Этот скачок объясняется в основном двумя причинами: применением цифровых вычислительных машин (ЦВМ) для выполнения оптических расчетов и проникновением в техническую оптику методов и понятий теории связи и информации, радиофизики и радиотехники, применяемых сейчас для оценки качества оптического изображения. Однако, несмотря на высокую скорость вычислений на ЦВМ и плодотворность новых идей анализа качества изображения, повышение скорости и качества оптического проектирования с применением ЦВМ оказалось меньшим, чем можно было ожидать. Одна из причин этого заключается в отсутствии достаточно полной, обоснованной и приспособленной для вычисления на ЦВМ системы характеристик, описывающих все свойства оптических систем. В основном используются традиционные характеристики ручного расчета, новые же понятия и характеристики, такие, например, как частотно-контрастные характеристики (ЧКХ), рассматриваются часто изолированно; сознательному использованию их мешает разнообразие терминологии, путаница трактовки, отсутствие универсальных, надежных и быстрых методов их расчета.

Одной из насущных задач в оптике становится поэтому упорядочение характеристик оптических систем и усовершенствование методов их расчета на ЦВМ с целью, во-первых, выбора характеристик, наиболее полно и наглядно описывающих работу оптической системы, во-вторых, приведения всех понятий и соотношений к виду, удобному для программирования и, в-третьих, максимального сокращения количества вычислений.

Настоящая диссертация является попыткой частичного решения этой задачи. Диссертация состоит из четырех глав.

В первой главе дается краткий обзор литературы, посвященной характеристикам оптических систем и методам их расчета, на основании которого формулируется задача данной работы, причем выделяются несколько основных аспектов обсуждаемой проблемы: характеристики оптических систем как приборов для передачи информации; дифракционная теория изображения и волновая теория аберраций; вычисление оптической передаточной функции (ОПФ) реальных систем; методы расчета лучей на ЦВМ.

Исходя из рассмотренного материала, формулируются три основные задачи данной работы: анализ основных характеристик оптических систем с

целью определения такого набора характеристик, который бы наиболее полно и наглядно описывал все свойства системы и был удобен для расчета на ЦВМ; рассмотрение методов расчета выбранных характеристик по конструктивным параметрам системы с целью разработки максимально экономичных и компактных методов и, наконец, реализация полученных методов в виде рабочего алгоритма для конкретной ЦВМ. В этой главе также вводятся ограничения, принятые при дальнейшем рассмотрении. Основное ограничение – это ограничение рассмотрения классом центрированных оптических систем.

Вторая глава – теоретическая – посвящена выбору характеристик, удобных для описания работы оптических систем и программирования, и выводу основных соотношений, связывающих характеристики между собой.

Прежде всего, рассматривается общий подход к построению системы характеристик любого прибора, на основании чего предлагается классификация характеристик. В соответствии с этим все характеристики разделяются на две большие группы в зависимости от точки зрения, с которой рассматривается прибор. Первую группу образуют так называемые внешние характеристики, описывающие прибор со стороны его назначения как звена в общей цепи передачи изображения. С этой точки зрения представляются несущественными как физический принцип действия Прибора, так и его устройство, поэтому внешние характеристики могут быть применены для описания работы любого звена, а не только оптических систем. Очевидно также, что конечной целью проектирования является достижение заданных или оптимальных значений именно этих, внешних характеристик.

Однако одних внешних характеристик недостаточно для сознательного проектирования. Конструктор, разработчик оптической системы, обязан принимать во внимание физические принципы, на которых основано ее устройство системы, для того, чтобы сознательно, наиболее рациональным способом проектировать систему, отвечающую заданным внешним характеристикам. Характеристики оптической системы, как и вообще любого прибора, описывающие физические принципы его работы с точки зрения конструктора, образуют вторую группу характеристик, которые можно назвать внутренними, поскольку они описывают внутренние, присущие только данному прибору, свойства.

Кроме того, почти любая характеристика может быть либо зональной, описывающей работу системы в пределах малой области на предмете, либо глобальной, описывающей работу системы в пределах всего поля зрения.

В свою очередь внешние характеристики разделяются на три основные группы, описывающие различные аспекты работы прибора в цепи передачи информации: передаточные, присоединительные и габаритные.

Передаточные характеристики, описывающие процесс образования изображения, далее подразделяются на три подгруппы, описывающие передачу различных свойств объекта. Масштабные передаточные характеристики описывают передачу размеров и форму предмета и включают в себя в качестве зональных обобщенные увеличения в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, а в качестве глобальных – обобщенное параксиальное увеличение и функцию относительной дисторсии.

Энергетические передаточные характеристики описывают передачу энергии предмета, определенной как интеграл от функции обобщенной интенсивности по обобщенным координатам, и включают в себя в качестве зональных обобщенные зональные светосилы, а в качестве глобальных – обобщенную центральную светосилу и функцию светораспределения.

Структурные или частотные характеристики описывают передачу тонкой структуры предмета и включают в себя совокупность зональных оптических передаточных функций (ОПФ), в общем случае комплексных. Каждая ОПФ представляется двумя вещественными функциями: своим модулем – частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) – и своим аргументом – частотно-фазовой характеристикой (ЧФХ). Таким образом, ЧКХ рассматривается как одна из передаточных характеристик, которые все вместе описывают все аспекты передачи изображения и образуют математическую модель работы оптической системы в цепи передачи.

Присоединительные характеристики, описывающие согласование данного звена цепи с предыдущим и последующим звеньями, разделяются на предметные, зрачковые и спектральные.

Предметные описывают положение и размеры поверхностей предмета и изображения (которые рассматриваются как физические поверхности) и включают в себя передний и задний обобщенные отрезки и поле зрения и изображения. Зрачковые присоединительные характеристики описывают положение, форму и размеры входного и выходного зрачков. Зональные зрачковые присоединительные характеристики определяют положение, форму и размеры зрачков для данной зоны (данной точки предмета) и

состоят из обобщенного положения входного и выходного зрачков и обобщенных передних и задних апертур. Глобальные зрачковые присоединительные характеристики включают в себя обобщенное положение входного и выходного зрачков для центральной зоны, центральные – переднюю и заднюю апертуры, а также функции aberrаций в положении зрачков и функции обобщенного переднего и заднего виньетирования.

Спектральные присоединительные характеристики, описывающие рабочий интервал длин волн света, включают в себя основную длину волны, полуширину рабочего интервала длин волн и функцию относительной спектральной эффективности.

В данной главе рассматриваются также основные соотношения между внешними характеристиками, имеющие наиболее общий характер. В частности, получено практически интересное простое выражение, однозначно определяющее светораспределение фотообъективов $\Phi'(y_0)$ через полевой угол на апертурной диафрагме β_D , дисторсию задней «половинки» $\Delta(y_0)$ и функцию геометрического виньетирования $F_g(y_0)$:

$$\Phi'(y_0) = \frac{\cos^4 \beta_D F_g(y_0)}{\left[1 + \Delta(y_0) + \frac{\partial \Delta(y_0)}{\partial y_0} y_0 \right] \cdot [1 + \Delta(y_0)]}.$$

Развитая к настоящему времени теория передаточных характеристик применима только к изопланатическим приборам, и по отношению к неизопланатическим приборам понятия ОПФ, ЧКХ и ЧФХ теряют свой смысл. В действительности в оптических приборах условие изопланатизма строго соблюдается редко, особенно при наличии таких aberrаций, как кома и т. п. Для решения вопроса о применимости ОПФ к неизопланатическим приборам в диссертации рассмотрена передача пространственных частот в общем случае неизопланатизма. Показано, что вместо обычной ОПФ $D(\nu')$ в качестве частотной передаточной характеристики может использоваться введенная автором «неизопланатическая ОПФ» $D(\nu, \nu')$ как функция, кроме обычной частоты ν' , также и частоты неизопланатизма ν .

Спектр частот $\tilde{I}'(\nu')$ изображения в этом случае может быть представлен в виде свертки по частоте неизопланатизма ν спектра $\tilde{I}(\nu)$ предмета и функции $D(\nu, \nu')$:

$$\tilde{I}'(\nu') = \int \tilde{I}(\nu - \nu) D(\nu, \nu') d\nu$$

Это общее выражение для передачи пространственных частот неизопланатическим прибором переходит в обычное соотношение «фильтрация» $\tilde{T}'(\nu') = \tilde{T}(\nu')D(\nu')$ при соблюдении изопланатизма. Условия, при которых данный неизопланатический прибор может рассматриваться как изопланатический и описываться обычной ОПФ, определяются, как показано, площадью интересующей нас зоны предмета в комплексном координатно-частотном пространстве, где по одной оси откладываются линейные размеры предмета, а по другой – диапазон содержащихся в нем пространственных частот.

Далее в этой главе рассматриваются конкретные реализации обобщенных понятий и координат в двух принципиально различных случаях – конечного и бесконечно большого расстояния до предмета (изображения). Для каждого из этих случаев были введены действительные координаты на поверхностях предмета и изображения, а также конкретизированы все обобщенные характеристики с таким условием, чтобы по возможности сохранить инвариантность всех основных соотношений. Благодаря физическому определению понятия бесконечности (с точки зрения смысла решаемой прибором задачи) получена полная симметрия между этими двумя случаями. Различные комбинации положения предмета и изображения образуют четыре принципиально различных типа оптических систем: зрительной трубы, фотообъектива, лупы или микроскопа, репродукционного объектива.

При построении системы внутренних характеристик на основании ряда приближений принята схема работы оптической системы, включающая в себя дифракцию в пространствах предметов и изображений, описываемую прямым и обратным преобразованиями Фурье, и геометрическое (лучевое) распространение, описываемое функцией комплексного пропускания – при прохождении через систему.

В такой модели все внутренние характеристики оптической системы для данной точки предмета и данной длины волны содержатся в функции комплексного пропускания – зрачковой функции, показывающей влияние оптической системы на амплитуду и фазу проходящей электромагнитной волны. Зрачковая функция описывается обобщенными апертурами, т.е. размерами области существования в обобщенных координатах на зрачках, своим модулем – коэффициентом пропускания амплитуды по зрачку – и своим аргументом – волновой абберацией в длинах волн.

В результате анализа преобразования координат на зрачках получено обобщенное условие изоплантизма, наиболее общее условие стационарности aberrаций по отношению к перемещению точки предмета; частными случаями этого общего условия являются известные законы косинусов, синусов и условие Штебле-Лигоцкого.

Введение обобщенных координат на предмете, изображении и зрачке позволило упростить и в то же время сделать универсальными фундаментальные выражения, описывающие работу оптической системы и связывающие зрачковую функцию с внешними характеристиками – обобщенными увеличениями, светосилами, ОПФ.

Далее рассматриваются так называемые канонические координаты, которые на зрачках нормируются к соответствующим апертурам, а на предмете и изображении – к удвоенному периоду предельной частоты. В канонических координатах любые системы, независимо от их типа и размера, представляются в виде систем с каноническим зрачком единичного радиуса и единичным увеличением. Тем самым облегчается сравнение коррекционных возможностей различных систем, и, что особенно, важно, появляется возможность унифицировать процесс машинного расчета характеристик любых типов оптических систем для любой точки предмета.

Выражение для ОПФ в канонических координатах, однако, также не свободно от недостатков. Во-первых, в этом выражении не разделено влияние дифракции как таковой и aberrаций. Во-вторых, при вычислении ОПФ возникают серьезные трудности, одним из основных источников которых является неудобная форма области интегрирования, не поддающаяся единому аналитическому описанию. Для устранения этих недостатков автором предложена эллиптическая аппроксимация контура области интегрирования в интеграле ОПФ. Заменой канонических координат на зрачке на координаты, нормированные к полуосям этого эллипса, последний преобразуется в единичный круг, который затем введением полярных координат преобразуется в единичный квадрат. После некоторых преобразований выражение для ОПФ представляется в виде двух сомножителей:

$$D(\omega, \theta_s) = D_0(\omega)D_0(\omega, \theta_s)$$

где $D_0(\omega)$ – ОПФ безабберационной системы; ω – относительная частота; θ_s – угол ориентации;

$$D_a(\omega, \theta_s) = \frac{1}{2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \exp[4\pi i \omega V(\omega, \rho_\omega^2, \varphi_\omega)] d\rho_\omega^2 d\varphi_\omega \quad - \quad \text{так называемый}$$

абберационный множитель или абберационная ОПФ; $V(\omega, \rho_\omega^2, \varphi_\omega)$ – некоторая функция, зависящая от волновой абберации $W(\rho, \varphi)$ и относительной частоты ω .

Полученные выражения дают желаемое разделение влияния на ОПФ дифракции и аббераций. В этих выражениях влияние аббераций целиком вынесено в абберационный множитель $D_a(\omega, \theta_s)$. Преимущества такого представления заключаются, во-первых, в том, что абберационный множитель выражает абберационные свойства системы в чистом виде для любых пространственных частот, наглядно показывая, какой вклад в ухудшение ОПФ вносят абберации, и, во-вторых; при вычислении ОПФ интегрирование всегда производится на единичном квадрате, независимо от частоты ω , что значительно упрощает схему вычислений, уменьшает количество вычислений и источники погрешностей.

Далее в этой главе рассматриваются различные способы представления волновой абберации—основного параметра зрачковой функции в канонических координатах. Показано, что независимыми параметрами, описывающими волновую абберацию, являются коэффициенты ее разложения по выбранному базису – степеням $\rho^2 = \beta^2 + \gamma^2$ и $\rho \cos \varphi = \beta$. В подавляющем большинстве случаев достаточно ограничиться коэффициентами не выше 5-й степени базиса, т. е. абберациями не выше 9-го порядка. Следовательно, 20 зональных коэффициентов до 9-го порядка включительно в совокупности с зональными апертурами полностью описывают работу оптической системы для данной точки предмета и являются, следовательно, зональными внутренними монохроматическими характеристиками системы.

Волновая абберация может быть также представлена связанными с ней функциями поперечных и, в некоторых случаях, продольных аббераций. Для упрощения выражений, связывающих волновую абберацию с поперечными и продольными, в диссертации введены понятия канонических аббераций.

Далее в диссертации рассматриваются методы вычисления ОПФ непосредственно по коэффициентам волновых аббераций. В отличие от некоторых существующих методов, которые предусматривают расчет большого количества лучей, в диссертации приводятся выражения, требующие не более 22 лучей в любом случае. В выражении для абберацион-

ного множителя ОПФ функция $V(\rho_\omega, \varphi_\omega)$, как и функция волновой аберрации $W(\rho, \varphi)$, оказывается определенной на единичном круге и, как показывает анализ, обладает аналогичными свойствами симметрии. Поэтому функцию V можно представить таким же разложением по координатам $\rho_\omega, \varphi_\omega$, как и функцию W по координатам ρ, φ , причем коэффициенты v_{ij} разложения функции V оказываются связанными с коэффициентами разложения волновой аберрации w_{ij} , довольно простыми соотношениями. Таким образом, при известных значениях коэффициентов волновой аберрации задача сводится к вычислению по ним коэффициентов разложения функции V и затем интегрированию мнимой экспоненты от этой функции на единичном круге. Такой непосредственный переход, возможный благодаря эллиптической аппроксимации области интегрирования, обеспечивает минимум необходимых вычислений.

В этой главе рассмотрены также глобальные характеристики и хроматизм. Для описания глобальных характеристик используется каноническая координата σ на предмете, нормированная к максимальной величине последнего. Для описания хроматизма оказывается удобным ввести безразмерную каноническую координату $\chi = \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}$, где λ и λ_0 – текущая и основная длины волн, $\Delta\lambda$ – полуширина рабочего интервала. Тогда хроматизм любой характеристики описывается коэффициентами хроматизма различных порядков – коэффициентами разложения этой характеристики в ряд по степеням χ . Основными хроматическими характеристиками будут коэффициенты хроматизма волновой аберрации – коэффициенты волнового хроматизма. Тогда волновая аберрация представляется своими коэффициентами разложения по четырем каноническим координатам $\chi, \sigma, \rho, \cos\varphi$ – коэффициентами глобального разложения волновой аберрации и волнового хроматизма.

В заключение рассматриваются вопросы представления полихроматической ОПФ. Непосредственное вычисление полихроматической ОПФ путем суммирования с соответствующим весом монохроматических ОПФ обладает некоторыми недостатками. В диссертации полихроматическая ОПФ представлена в виде тройного интеграла по трем каноническим координатам:

$$D(\omega_0, \theta_s) = D_0(\omega_0) \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} q_\omega(\chi, \omega_0) \exp[4\pi i \omega_0 V(\omega_0, \theta_s, \chi, \rho_\omega, \varphi_\omega)] d\chi d\rho_\omega^2 d\varphi_\omega$$

В этом выражении область интегрирования всегда представляет собой параллелепипед с фиксированными размерами, образованный координатными плоскостями, благодаря чему значительно упрощается алгоритм вычислений и уменьшается количество действий.

В третьей главе рассматриваются методы расчета характеристик по известным конструктивным параметрам оптической системы.

В первую очередь рассматривается процедура расчета луча через произвольную поверхность вращения. Существующие в настоящее время многочисленные алгоритмы обладают некоторыми существенными недостатками, связанными с выбором уравнения поверхности и низкой скоростью расчета. Автором предложено универсальное уравнение, описывающее любую поверхность вращения и удовлетворяющее всем практическим требованиям. Параметрами уравнения являются порядок уравнения p , кривизна при вершине ρ_0 , эксцентриситет e^2 , а для поверхностей высшего порядка, кроме того, световая (измерительная) высота h и деформации высших порядков на этой высоте a_k . Применение координат, учитывающих симметрию системы, применение метода Федера для уточнения точки встречи с поверхностью высшего порядка, а также приведение формул преломления к виду, не требующему единичного вектора нормали, позволили добиться существенного сокращения количества вычислений. В конечном итоге получен универсальный и сравнительно компактный алгоритм расчета луча через произвольную поверхность вращения.

Следующая задача, рассмотренная в этой главе, – вычисление входных и выходных данных луча. Эта задача заключается в переходе от канонических координат луча, описанных во второй главе, к координатам Федера, в которых производится расчет луча перед входом его в систему, и в обратном переходе после выхода луча из системы. Приведенные в диссертации выражения являются универсальными, не содержат особых случаев и неэлементарных операций. Они позволяют после расчета луча определить его обобщенные поперечные аберрации, координаты на выходном зрачке и оптическую длину хода от последней поверхности до выходной сферы.

Одной из нерешенных задач является задача нахождения габаритов пучка лучей. Существующие методы отличаются медленной сходимостью,

малой точностью и во многих случаях не работают. В диссертации задача отыскания габаритов приводится к поиску в одномерном пространстве верхней и нижней границ некоторой области, определяемой множеством граничных условий. В результате анализа этой задачи предложен алгоритм поиска указанных границ при наличии произвольного количества и вида условий, имеющий универсальную и быструю сходимость.

Затем рассматриваются методы определения коэффициентов волновой aberrации и волнового хроматизма по данным расчета лучей. При этом встает вопрос о выборе необходимого и достаточного количества лучей и о расположении их по зрачку. Показано, что решающим фактором является обусловленность и объем матрицы преобразования значений волновых aberrаций отдельных лучей в коэффициенты волновой aberrации, причем наилучший выбор соответствует разбиению общей матрицы преобразования на ряд матриц меньшей размерности. В диссертации приводятся выражения, позволяющие сравнительно просто определить все 87 коэффициентов глобального разложения волновой aberrации по данным расчета около 100 лучей, объединенных в 5 пучков. Все матрицы преобразования имеют порядок не выше 5 и могут быть рассчитаны раз и навсегда. Благодаря этому количество вычислений и необходимый объем памяти значительно сокращаются.

Для вычисления хроматизма в диссертации применен приближенный метод Конради, который позволяет найти волновой хроматизм для данной длины волны без дополнительных расчетов, одновременно с расчетом луча для основной длины волны. В результате некоторого развития указанного метода получены выражения для коэффициентов волнового хроматизма непосредственно через коэффициенты хроматизма стекол, которые могут быть просто рассчитаны заранее или считаны из машинного каталога стекла.

Далее рассматриваются изменения характеристик оптической системы при измерении положения поверхности предметов или изображений, т. е. при расфокусировке. В диссертации приводятся выражения, непосредственно дающие связь изменения коэффициентов зонального разложения волновой aberrации с расфокусировкой для случая конечного расстояния до предмета (изображения) и для случая бесконечности. Как следствие из приведенных выражений выводится обобщенное условие Гершеля — условие стационарности качества изображения при смещении предмета вдоль оси.

Наибольшее количество вычислений, как известно, требуется при расчете интеграла ОПФ. Использование выражения ОПФ в канонических

координатах в виде тройного интеграла в фиксированной области интегрирования, приведенное в предыдущей главе, позволяет уменьшить количество узлов интегрирования и количество действий за счет устранения погрешности, вызванной криволинейной границей области. Кроме того, появляется возможность вычислить заранее все величины, связанные только с узлами интегрирования, и применить 'для интегрирования мощный метод Гопкинса по всем трем переменным. Дальнейшее сокращение количества вычислений достигнуто за счет усовершенствования метода Гопкинса с целью учета первой и второй производных весовой функции $q(\chi)$ – функции относительной спектральной эффективности, – что позволило уменьшить количество узлов при непостоянной $q(\chi)$. В заключение в третьей главе рассматривается процесс вычисления подынтегральной функции и ее производных, необходимых при интегрировании.

В четвертой главе приводится описание программы для расчета характеристик центрированных оптических систем, построенной на теоретическом материале предыдущих глав, а также некоторые результаты испытания программы.

Программа составлена применительно к ЦВМ «Минск-22» в основном на языке «АКИ» и организована в виде отдельных блоков, объединенных в общий алгоритм.

Характеристики, рассчитываемые в процессе работы программы, есть внешние и внутренние характеристики, описанные в главе второй, а именно: обобщенное увеличение, дисторсия, светосилы, светораспределения, монохроматические и полихроматические ЧКХ, задний отрезок, обобщенные положения зрачков и их абберрации, апертуры, функции геометрического виньетирования, коэффициенты волновой абберрации и волнового хроматизма. Предусмотрены максимально возможное сокращение времени расчета за счет сокращения избыточных вычислений, наиболее удобная и универсальная форма задания исходных данных и их контроль в процессе расчета.

Приведены результаты испытания отдельных блоков программы, показывающие удовлетворительную точность расчета и сравнительную эффективность по сравнению с существующими. В частности, блок расчета луча через поверхность обеспечивает нахождение точки встречи с любой поверхностью высшего порядка не более, чем за 4 итерации, погрешность определения координат луча не более чем 10^{-7} , скорость расчета – около 30 поверхностей в секунду. Блок нахождения границ пучка обеспечивает

нахождение границы с точностью 0,005 не более, чем за 4 итерации из любой начальной точки. Приближенный метод расчета хроматизма обеспечивает удовлетворительную точность 5-10%. Наконец, предложенный метод расчета ОПФ обеспечивает погрешность не более 0.03 при количестве узлов интегрирования $7 \times 7 \times 57$ по трем переменным соответственно, при среднем времени вычисления одного значения полихроматической ОПФ не более 20 сек, что значительно быстрее большинства существующих программ.

Основные результаты работы:

1. На основании анализа характеристик оптических систем предложена достаточно полная и универсальная система обобщенных характеристик, описывающая основные свойства оптической системы и удобная для программирования.

2. Рассмотрены передаточные характеристики неизопланатических приборов. Получено общее выражение для передачи пространственных частот в отсутствие изопланатизма. Определены условия, при которых прибор может считаться изопланатическим.

3. На математической модели оптической системы как преобразователя электромагнитного поля построена система внутренних характеристик, описывающих физические принципы работы системы. Предложены обобщенные координаты на зрачках, позволившие упростить основные выражения без потери универсальности. Из рассмотрения преобразования координат на зрачках получено обобщенное условие изопланатизма.

4. Предложена эллиптическая аппроксимация области интегрирования в выражении для ОПФ, которая позволила упростить это выражение и разделить в нем влияние собственно дифракции и аберраций.

5. Получено выражение для полихроматической ОПФ в виде тройного интеграла в фиксированном параллелепипеде в виде, наиболее удобном для практического вычисления.

6. Предложено универсальное уравнение для описания несферических поверхностей вращения, а также компактный алгоритм расчета луча через такую поверхность.

7. Выведены формулы расчета входных и выходных данных луча применительно к принятой системе координат; предложен эффективный алгоритм нахождения границ пучка при наличии произвольных граничных условий. Развита метод расчета коэффициентов волнового хроматизма, не требующий расчета дополнительных лучей; при помощи коэффициентов

хроматизма стекол. Получены формулы, выражающие влияние расфокусировки на коэффициенты волновой аберрации в общем случае.

8. Развита метод вычисления ОПФ, позволивший существенно повысить скорость вычислений ОПФ реальных систем.

9. Разработана программа для ЦВМ «Минск-22», реализующая рассмотренные методы. Проведено испытание программы, показавшее ее высокую эффективность по сравнению с существующими.

Результаты работы докладывались на XVII и XIX научно-технических конференциях ЛИТМО (Ленинград, 1967 и 1969 гг.), на научно-техническом совещании «Оптические и световые измерения» в НТО Приборпром (Ленинград, 1969г.) и на Всесоюзной конференции по созданию и внедрению новых оптических систем различного назначения (Ленинград, 1971 г.). Отдельные положения диссертации были изложены в курсах лекций, прочитанных автором для сотрудников Ленинградского института точной механики и оптики, Ленинградского оптико-механического объединения и Центрального конструкторского бюро киноаппаратуры.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] Родионов С.А. Применение ЭЦВМ в оптических расчетах. Изв. вузов СССР –«Приборостроение», 1968, т. 11, № 3.
- [2] Бабак Э.В., Иванов П.Д., Котлецов Б.Н., Родионов С.А. Подводная фотография. Л., Изд-во «Машиностроение», 1969.
- [3] Родионов С.А. О нормализации и измерениях характеристик оптических систем. Тезисы докладов научно-технического совещания «Оптические и световые измерения», НТО Приборпром, Л., 1969.
- [4] Родионов С.А. Эллиптическая аппроксимация контура области интегрирования в выражении для ОПФ центрированных оптических систем. Тезисы докладов Всесоюзной конференции по созданию и внедрению новых оптических систем различного назначения. Изд. ЛИТМО, Л., 1971.
- [5] Родионов С.А. О вычислении полихроматической оптической передаточной функции оптических систем. Тезисы докладов Всесоюзной конференции по созданию и внедрению новых оптических систем различного назначения. Изд. ЛИТМО, Л., 1971.
- [6] Родионов С.А. О передаче пространственных частот неизопланатическими приборами. «Оптика и спектроскопия». (В печати).

Подписано к печ. 3/IX-1971 г, М-08269 Формат бум. 60x84'Лб.
Объем 1 печ. л. Зак. 352 Тираж 120 Бесплатно
Типография 3/1 УПЛ. Ленинград, центр, пер. Гривцова, 14.