

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

На правах рукописи

ЕЖОВА КСЕНИЯ ВИКТОРОВНА

УДК 535.317; 681.7

**АВТОМАТИЗАЦИЯ КОРРЕКЦИИ
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ДИСТОРСИИ ПРОЕКЦИОННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2007

Работа выполнена на кафедре прикладной и компьютерной оптики
Санкт-Петербургского государственного университета информационных
технологий, механики и оптики.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Н.Б. ВОЗНЕСЕНСКИЙ

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
И.А. КОНЯХИН
кандидат технических наук, с.н.с.
А. А. БАГДАСАРОВ

Ведущее предприятие – ГНПО «ПЛАНАР» (Минск, Республика Беларусь)

Защита диссертации состоится 29 мая 2007 года в 15 ч. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.227.01 “Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы” при Санкт-Петербургском государственном
университете информационных технологий, механики и оптики по адресу:
Санкт-Петербург, пер. Гривцова, д. 14, аудитория 314-а.

Автореферат разослан 25 апреля 2007 года.

Отзывы и замечания (в 2 экз.) по автореферату направлять в адрес
университета: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, секретарю
диссертационного совета Д 212.227.01.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.227.01,
кандидат технических наук, доцент

В. М. КРАСАВЦЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последнее время большое распространение получили оптические системы типа проекционных объективов, которые используются в разнообразных современных технологиях. Отличительной особенностью систем такого класса является необходимость обеспечения высокоточного преобразования не только тонкой структуры объекта, но и всей его геометрии с высокой точностью. К таким системам относятся, прежде всего, проекционные объективы для фотолитографии, используемые не только в производстве «микрочипов», но и при изготовлении других достаточно больших по площади схем соединений, в частности жидкокристаллических дисплеев. К проекционным объективам этого вида предъявляются высокие требования по качеству сборки и юстировки. Одна из проблем, возникающих в процессе сборки таких оптических систем - контроль допустимых значений децентрировок поверхностей и компонентов.

Системы так же должны быть не только скорректированы на минимизацию зональных аберраций для отдельных точек поля зрения, но и обладать минимальными аберрациями по всему полю зрения, в том числе весьма малой дисторсией, коррекция которой должна быть такого же высокого уровня, как и коррекция аберраций, определяющих контраст изображения тонкой структуры объекта. Поэтому задача разработки методов анализа дисторсии с последующей возможностью ее коррекции является весьма актуальной.

Цель работы

Целью работы является математическое моделирование, исследование и анализ дисторсии в оптических системах в зависимости от параметров оптической системы при наличии ошибок изготовления и сборки. Выбор именно дисторсии связан с тем, что дисторсия является хорошим индикатором наличия несимметричных ошибок в оптической системе.

Задачи исследования

1. Анализ децентрировок первого, третьего и более высоких порядков.
2. Разработка математического аппарата расчета квазипараксиальных лучей через оптическую систему с децентрировками.
3. Разработка математического аппарата расчета изображений автоколлимационных точек поверхностей через ту часть децентрированной оптической системы, которая находится между автоколлиматором и измеряемой поверхностью.
4. Разработка и исследование математического аппарата анализа дисторсии по данным измерения поперечных аберраций реальной оптической системы.
5. Разработка алгоритма компенсации децентрировок с учетом результатов анализа измерений дисторсии и таблицы влияния параметров оптической

системы на коэффициенты разложения аберраций по полиномам Цернике.

Методы исследования

1. Методы решения систем линейных алгебраических уравнений.
2. Аналитические и численные методы аппроксимации функций и аппарат вычисления ортогональных полиномов Цернике.
3. Методы объектно-ориентированного программирования.
4. Тестирование математических моделей путем согласования экспериментальных исследований и теоретических расчетов.

Научная новизна диссертации

1. Предложен новый подход к исследованию и анализу дисторсии, при котором дисторсия рассматривается, как самостоятельное искажение, вносимое оптической системой независимо от других аберраций.
2. Для описания дисторсии используется разложение по полиномам, ортогональным по полю. Для минимизации дисторсии, используется понятие минимизации коэффициентов ее разложения по ортогональному базису, которое позволяет скорректировать дисторсию сразу по всему полю.
3. Разработана система ортогональных 4-х мерных полиномов типа полиномов Цернике, зависящих от координат поля и зрачка, однозначно описывающих отдельные компоненты дисторсии, а также поправку фотограмметрического увеличения. Опираясь на это свойство 4-х мерных полиномов, можно минимальным количеством коэффициентов однозначно описать, независимо друг от друга, разнообразные виды дисторсии, причем достаточно сложные. Коэффициенты при таких полиномах линейно связаны с конструктивными параметрами оптической системы и поэтому могут быть использованы при вычислении подвижек, корректирующих фотограмметрическую дисторсию. Двумерные полиномы же, зависящие только от координат поля, описывают разные искажения в разных сечениях, что делает невозможным их использование в качестве параметров коррекции дисторсии.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Разработанный математический аппарат расчета квазипараксиальных лучей через оптическую систему с децентрировками.
2. Метод определения положения «эффективной» оси оптической системы, который позволяет определять реальные децентрировки в оптической системе.
3. Система ортогональных 4-х мерных полиномов типа полиномов Цернике, позволяющих разделить компоненты дисторсии на независимые друг от друга функции, сохранив при этом высокую степень линейности зависимости дисторсии от параметров оптической системы.

4. Математическая модель дисторсии с процедурой восстановления картин дисторсии на основе данных измерения поперечных аберраций.

Практическая ценность работы

1. Разработан метод, который позволяет в условиях производства организовать автоматизированный процесс компенсации децентрировок в оптических системах на основе достаточно ясных и простых требований к измерениям, что не только значительно ускоряет процесс юстировки широкопольных оптических систем, но и существенно повышает его точность.
2. Принципы данного метода можно применить к более сложным аберрациям (таким, как кома, астигматизм, кривизна поверхности изображения) при наличии дополнительных средств для проведения измерений, причем дальнейшая обработка измеренных значений базируется на том же математическом аппарате.
3. Предложенную методику можно использовать при сборке достаточно больших сборочных единиц.
4. Разработана методика для определения положения «эффективной» оси и фактических децентрировок оптической системы, отсчитываемых от этой оси.
5. На основе разработанного математического аппарата создан программный комплекс, который может быть использован на предприятиях, где производятся современные широкопольные прецизионные ортоскопические системы.
6. Результаты работы могут быть использованы на этапе моделирования процедуры сборки оптической системы.

Апробация работы

Основные результаты работы представлялись на I конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО (16 – 19 февраля 2004 года), на II межвузовской конференции молодых ученых (28 – 31 марта 2005 года), на IV международной конференции молодых ученых и специалистов “Оптика-2005” (17 – 21 октября 2005 года), на XXXV научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО “Достижения ученых, аспирантов и студентов университета в науке и образовании” (31 января – 3 февраля 2006 года), на III межвузовской конференции молодых ученых (10 – 13 апреля 2006 года), а также на XXXVI научной и учебно-методической конференции профессорско-преподавательского и научного состава (30 января – 2 февраля 2007 года).

Результаты работы использовались при выполнении НИР “Компьютерное моделирование и разработка оптико-информационных систем и технологий”.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 печатные работы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 98 наименований и двух приложений; содержит 122 страницы основного текста, 43 рисунка и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

В последние несколько лет в результате усложнения технологий производства, использующего принципы фотолитографии, ужесточились требования к качеству оптических систем типа проекционных объективов. Такие системы применяются при производстве больших по площади схем соединений, используемых в производстве многих устройств современной электроники. Одна из особенностей систем такого класса - требования к обеспечению высокоточного преобразования не только тонкой структуры объекта, но и всей его геометрии с высокой точностью. Очевидно, что значительно повышаются требования к качеству сборки и юстировки. Основная проблема, возникающая в процессе сборки таких систем - контроль допустимых значений децентрировок поверхностей и компонентов.

Системы так же должны быть не только скорректированы на минимизацию зональных aberrаций для отдельных точек поля зрения, но и обладать минимальными aberrациями по всему полю зрения, и коррекция полевых aberrаций, в том числе дисторсии, должна быть такого же высокого уровня, как и коррекция aberrаций, определяющих контраст изображения тонкой структуры объекта. Возникает необходимость создания математической модели, направленной на исследование возможности коррекции фотограмметрической дисторсии и разработки на ее основе программного комплекса, предназначенного для автоматизации коррекции дисторсии проекционных оптических систем.

В данной работе разработана и проанализирована математическая модель коррекции фотограмметрической дисторсии в оптических системах в зависимости от параметров оптической системы при наличии ошибок изготовления и сборки. В работе рассматривается фотограмметрическая дисторсия, т.е. дисторсия, которая не содержит ошибки увеличения. Были рассмотрены два уровня анализа децентрировок:

- Децентрировки первого порядка, которые рассчитываются впервые предлагаемыми в данной работе методами квазипараксиальной оптики (т.е. оптики малых углов и малых высот);
- Децентрировки третьего и более высоких порядков, для анализа которых необходим более сложный аппарат, базирующийся на оптике реальных лучей и математическом аппарате анализа измеряемых поперечных aberrаций.

Глава 1. Методы контроля ошибок симметрии вращения в прецизионных оптических системах

В первой главе диссертационной работы проводится анализ существующих методов контроля ошибок симметрии вращения в прецизионных оптических системах. Если обобщить весь комплекс известных многообразных методов исследования и контроля качества сборки оптических систем, можно прийти к выводу о том, что эти методы сводятся, в основном, или к исследованию биения изображения при вращении системы, или к регистрации структуры волнового фронта, сформированного системой в схеме контроля, и исследованию этой структуры, которая визуализируется в форме изображения того или иного вида, например в виде интерференционных полос, теневой картины, изображения светящейся точки, линии, миры и т.д.

Очевидно, что каждый из рассмотренных методов имеет свои недостатки. Так, определение децентрировок поверхностей оптической системы, при контроле на коллимационных установках, рассчитываются через параксиальное увеличение части оптической системы, которая располагается после исследуемой на децентрирование поверхности, при этом не учитываются децентрировки поверхностей системы, находящихся между исследуемой поверхностью и плоскостью анализа.

Методы контроля, основанные на регистрации волнового фронта, требуют дополнительного оборудования. Метод нейронных сетей оптимизирует (компенсирует) децентрировку путем подбора смещения отдельных компонентов оптической системы, что значительно увеличивает время, необходимое для проведения процедуры сборки и юстировки оптической системы. Так же на сегодняшний день к недостаткам этого метода можно отнести дороговизну оборудования и программного обеспечения и неустойчивость к вибрациям. С использованием модификации метода Ронки возможен только анализ децентрировок по одной оси, перпендикулярной полосам дифракционной решетки. Данный метод направлен в основном на обнаружение наличия децентрировок и оценку их порядка, но не на возможность оптимизации или компенсации децентрировок в оптической системе.

Поэтому возникает необходимость использования методов контроля и анализа децентрировок, которые разумно сочетали бы преимущества рассмотренных ранее методов, по возможности, избегая их недостатков.

Глава 2. Анализ децентрировок поверхностей в оптической системе на основе методов гауссовой оптики

Вторая глава диссертационной работы содержит анализ децентрировок первого порядка, разработку математического аппарата Гауссовой оптики для децентрированной оптической системы и анализ применения разработанного математического аппарата.

С помощью методов первого порядка можно вычислить реальные децентровки поверхностей, определить положение эффективной оси, и, таким образом, оценить имеющиеся децентровки по отношению к более оптимальной точке отсчета.

Такие данные необходимы для определения начальных децентровок оптических деталей или узлов, которые имеются в оптической системе сразу после сборки, и дальнейшие возможные юстировочные подвижки необходимо отсчитывать от этих начальных децентровок.

Для определения методов первого порядка необходимо решить следующие задачи: произвести расчет положения оптической оси системы, выбор компонентов для компенсационных подвижек и вычисление реальных децентровок.

Разработанная на этом этапе математическая модель предназначена для использования на предварительных этапах юстировки оптических систем.

В работе используется трассировка луча через децентрированную оптическую систему по законам хода параксиальных лучей. Для решения поставленных задач разработан математический аппарат, учитывающий децентровки поверхностей оптической системы в двух взаимно перпендикулярных сечениях.

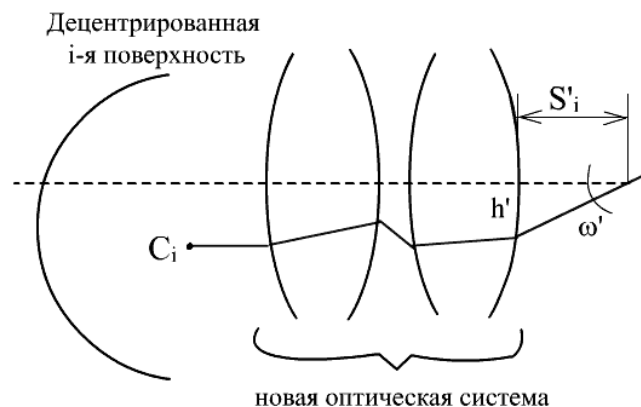


Рис. 2.1. Схема определения положения автоколлимационной точки

Для расчета положения автоколлимационной точки выбранной децентрированной поверхности необходимо сформировать оптическую систему, состоящую из части системы после данной поверхности, и определить выходные координаты параксиального луча, проходящего через центр кривизны исследуемой поверхности, без учета децентровок новой системы.

Высота параксиального луча на первой поверхности новой системы описывается простым выражением:

$$h_1 = -dc_y. \quad (2.1)$$

Положение точки определяется соотношением:

$$s_i' = h' / \omega' \quad (2.2)$$

Для нахождения изображения автоколлимационной точки вычисляются координаты параксиального луча, проходящего через центр кривизны поверхности, в плоскости расположения автоколлимационной точки, с учетом децентрировок всех поверхностей новой системы.

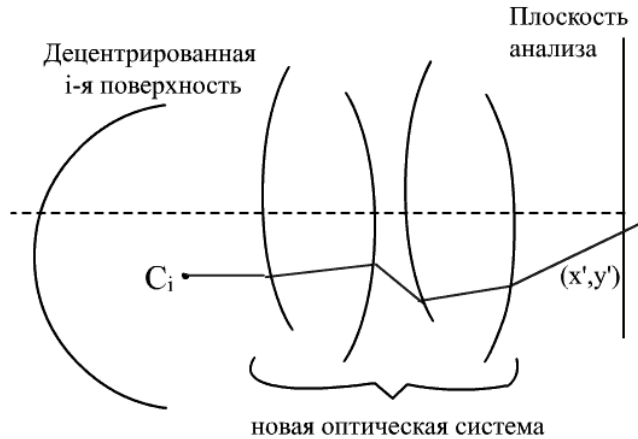


Рис. 2.2. Схема определения отклонения изображения автоколлимационной точки

Если изображения автоколлимационных точек измерены, то можно вычислить реальные децентрировки поверхностей, решая обратную задачу. Для этого оборачиваем оптическую систему, принимаем входные координаты параксиального луча равными отклонению автоколлимационной точки, угол падения луча на первую поверхность системы равным нулю. Затем определяем положение параксиального луча в плоскости анализа, совпадающей с рассматриваемой децентрированной поверхностью. Расчет луча производим с учетом децентрировок поверхностей.

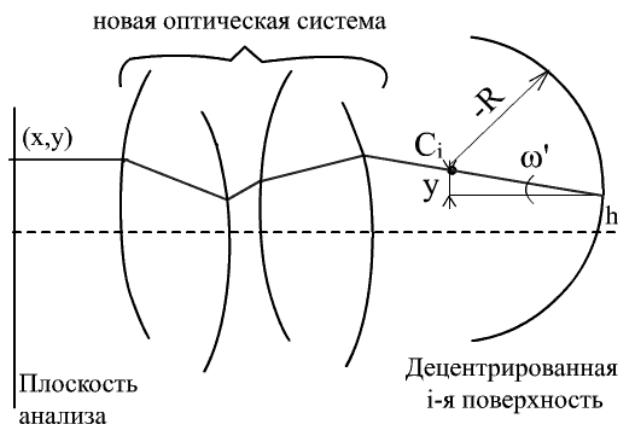


Рис. 2.3. Схема определения положения центра кривизны поверхности

После этого, используя простые геометрические соотношения (2.3) и (2.4), можно определить реальное положение центра кривизны исследуемой поверхности оптической системы:

$$y = -R \cdot \omega', \quad (2.3)$$

$$d_c = h' - y. \quad (2.4)$$

В работе предложен новый метод определения фактического положения базовой оси системы – «эффективной» оси системы.

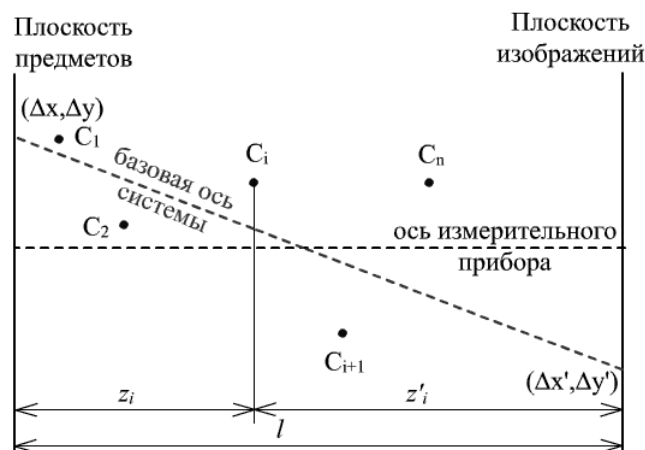


Рис. 2.4. Схема определения положения «эффективной» оси системы

Для этого формируется система уравнений в матричном виде:

$$\mathbf{D} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{f}. \quad (2.5)$$

Неизвестными в этой системе являются 4 параметра положения оптической оси, формирующие вектор:

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta x' \\ \Delta y' \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

В качестве конструкционной матрицы используется матрица производных этих параметров по децентрировкам, структура которой определяется соотношением:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \ddot{\Delta x}_i}{\partial \Delta x_0} & \frac{\partial \ddot{\Delta x}_i}{\partial \Delta y_0} & \frac{\partial \ddot{\Delta x}_i}{\partial \Delta x'_0} & \frac{\partial \ddot{\Delta x}_i}{\partial \Delta y'_0} \\ \frac{\partial \ddot{\Delta y}_i}{\partial \Delta x_0} & \frac{\partial \ddot{\Delta y}_i}{\partial \Delta y_0} & \frac{\partial \ddot{\Delta y}_i}{\partial \Delta x'_0} & \frac{\partial \ddot{\Delta y}_i}{\partial \Delta y'_0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

Элементы матрицы производных вычисляются по формулам (2.8), (2.9) и (2.10):

$$\frac{\partial \Delta x_i}{\partial \Delta x_0} = \frac{\partial \Delta y_i}{\partial \Delta y_0} = \frac{-z'_i}{l}, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \Delta x_i}{\partial \Delta x'_0} = \frac{\partial \Delta y_i}{\partial \Delta y'_0} = \frac{-z_i}{l}, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \Delta x_i}{\partial \Delta y_0} = \frac{\partial \Delta x_i}{\partial \Delta y'_0} = \frac{\partial \Delta y_i}{\partial \Delta x_0} = \frac{\partial \Delta y_i}{\partial \Delta x'_0} = 0. \quad (2.10)$$

Правые части системы уравнений - это вектор децентрировок поверхностей, определяемый соотношением:

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} \dots \\ dc_{x_i} \\ dc_{y_i} \\ \dots \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

В результате решения системы методом наименьших квадратов получаем отклонения оптической оси системы в плоскости предметов и в плоскости изображений.

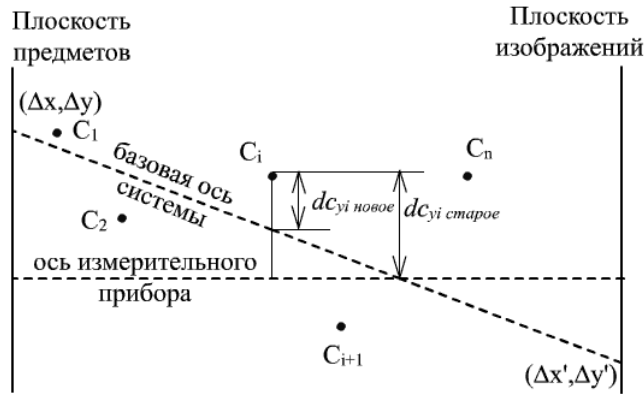


Рис .2.5. Схема уменьшения децентрировок поверхностей

Относительно нового положения оптической оси системы децентрировки поверхностей системы пересчитываются в соответствии с выражениями:

$$dc_{x_i} = dc_{x_i} - \left(\frac{\Delta x - \Delta x'}{l} \cdot z'_i \right) - \Delta x', \quad (2.12)$$

$$dc_{yi} = dc_{yi} - \left(\frac{\Delta y - \Delta y'}{l} \cdot z'_i \right) - \Delta y'. \quad (2.13)$$

Децентрировки поверхностей оптической системы, рассчитанные по отклонениям автоколлимационных изображений от базовой оси при использовании полученного математического аппарата, существенно отличаются от децентрировок, рассчитанных вручную через параксиальное увеличение. Ручные вычисления менее корректны, т.к. не учитывают децентрировки поверхностей системы, находящихся между исследуемой поверхностью и плоскостью анализа.

Таблица 2.1. Сравнение результатов расчета

№	Расчет программы с учетом децентрировок		Ручной расчет без учета децентрировок	
	Децентрировка по оси x, dc_x , МКМ	Децентрировка по оси y, dc_y , МКМ	Децентрировка по оси x, dc_x , МКМ	Децентрировка по оси y, dc_y , МКМ
1.	-5.9994	21.0003	-34.5605	16.9242
2.	-7.0001	-10.0002	0.958273	41.0737
3.	20.0005	-7.0001	14.6911	19.2063
4.	30.0002	-10.0005	37.9862	-72.5368
5.	6.0000	21.0002	-0.859326	27.3544
6.	-3.0002	-10.0001	-14.7019	-6.09935
7.	15.0001	-16.0000	12.5098	-15.1699
8.	30.0000	-10.0000	30.0000	-10.0000

Глава 3. Исследование и анализ дисторсии в оптических системах при наличии ошибок изготовления и сборки

В третьей главе диссертационной работы рассматривается анализ децентрировок более высоких порядков, разработка математической модели фотограмметрической дисторсии и математическое моделирование процесса юстировки оптических систем (по данным измерения дисторсии).

Анализ децентрировок более высоких порядков позволяет:

- оценить влияние децентрировок на дисторсию, в которой возможно сложение и взаимная комбинация аберраций, т.е. оценить реальную дисторсию;
- осуществить возможное уменьшение остаточной дисторсии на основе матрицы влияния параметров, используемой в специальных алгоритмах коррекции дисторсии на основе метода наименьших квадратов.

В работе предлагается математический аппарат анализа дисторсии широкопольных систем, включающий в себя:

- Обработку данных измерений поперечных aberrаций большого количества точек на предмете;
- Определение коэффициентов разложения по двумерным полиномам, зависящим только от координат поля;
- Расчет через коэффициенты первичного базиса коэффициентов разложения по 4-х мерным полиномам, зависящим от координат поля и зрачка;
- Решение задачи частичной компенсации децентрированной составляющей дисторсии путем сопоставления величин глобальных коэффициентов с матрицей влияния параметров.

При первичной обработке данных измерения поперечных aberrаций производится операция центрирования измеренных координат изображений центров марок, нанесенных на тест-объект, x'_i и y'_i , и координат самих центров марок на тест-объекте x_i и y_i , в соответствии с выражениями (3.1), (3.2), (3.3) и (3.4):

$$x'_{0i} = x'_i - \sum_{j=1}^N \frac{x'_j}{N}, \quad (3.1)$$

$$y'_{0i} = y'_i - \sum_{j=1}^N \frac{y'_j}{N}, \quad (3.2)$$

$$x_{0i} = x_i - \sum_{j=1}^N \frac{x_j}{N}, \quad (3.3)$$

$$y_{0i} = y_i - \sum_{j=1}^N \frac{y_j}{N}. \quad (3.4)$$

Затем по формулам (3.5) и (3.6) определяются значения дисторсии:

$$\Delta x'_i = \frac{NA'}{\lambda} (x'_{0i} - V_0 x_{0i}), \quad (3.5)$$

$$\Delta y'_i = \frac{NA'}{\lambda} (y'_{0i} - V_0 y_{0i}). \quad (3.6)$$

Таким образом, получаются составляющие дисторсии по выбранным при измерении двум координатным осям. Однако данные составляющие суммируют в себе расчетную дисторсию, дисторсию, вызванную разными

типами погрешностей изготовления и сборки деталей объектива и погрешности измерений, что не позволяет их использовать непосредственно для аттестации и юстировки.

Полученные после измерений составляющие дисторсии можно рассматривать в качестве поперечных aberrаций, т.е. в качестве частных производных волновой aberrации, как представлено в выражениях:

$$\Delta x' = \frac{\lambda}{NA} \cdot \frac{\partial W}{\partial \rho_x}, \quad (3.7)$$

$$\Delta y' = \frac{\lambda}{NA} \cdot \frac{\partial W}{\partial \rho_y}, \quad (3.8)$$

тогда для математического моделирования фотограмметрической дисторсии, возникающей в результате децентрировок при сборке оптических систем, возможно применение математического моделирования такой дисторсии с помощью косинусных и синусных полиномов Цернике, которые и формируют разложение фотограмметрической дисторсии. Использование полиномов Цернике в данной работе позволяет разделить направления децентрировок.

Для учета влияния дисторсии на изображение необходимо вписать в поле зрения сетку с определенным, заранее заданным, числом ячеек. В этом случае при отсутствии дисторсии получаем изображение аналогичное полю зрения, если же дисторсия присутствует, то сетка искажается. По характеру искажения можно определить, какими коэффициентами вызвана дисторсия.

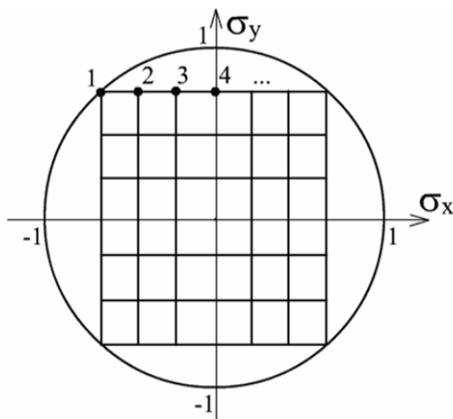


Рис. 3.1. Поле зрения. Сетка

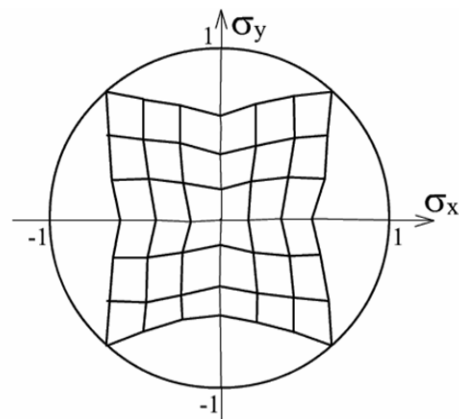


Рис. 3.2. Учет влияния дисторсии

Для разработки методов определения коэффициентов первичного разложения дисторсии, необходимо решить обратную задачу – создать искажение сетки путем смещения вершин сетки от их номинального положения в поле зрения.

Для каждой точки поля зрения в каждом сечении сформирован общий вектор полиномов, где записывается вектор косинусных (3.9) и вектор синусных (3.10) полиномов:

$$P_{Ci} = (P_{Ci00}, \dots, P_{Ci mn}), \quad (3.9)$$

$$P_{Si} = (P_{Si11}, \dots, P_{Si mn}). \quad (3.10)$$

Поле зрения описывается матрицей полиномов:

$$\begin{pmatrix} P_0(\sigma_{x_1}, \sigma_{y_1}) & P_1(\sigma_{x_1}, \sigma_{y_1}) & \dots \\ P_0(\sigma_{x_2}, \sigma_{y_2}) & P_1(\sigma_{x_2}, \sigma_{y_2}) & \dots \\ P_0(\sigma_{x_3}, \sigma_{y_3}) & P_1(\sigma_{x_3}, \sigma_{y_3}) & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

по столбцам которой располагаются косинусные и синусные полиномы, по строкам – точки.

При перемножении матрицы полиномов на вектор первичных коэффициентов полиномов Цернике, заданных заранее, получаем смещение каждой точки поля, относительно номинального положения. Для наглядности задаем коэффициент масштабирования k_{SC} . Принимаем $\lambda = 365 \text{ нм}$, $NA = 0.06$. В результате получаем вектор, описывающий искажение прямоугольной сетки, вписанной в окружность, которая представляет поле зрения, в зависимости от выбранного направления искажения или сечения (по оси x или y).

Математически это можно описать выражениями (3.12) и (3.13), где \mathbf{CS}_x - вектор косинусных и синусных коэффициентов по оси x ; \mathbf{CS}_y - вектор косинусных и синусных коэффициентов по оси y :

$$\Delta \mathbf{X}' = \frac{\lambda}{NA} \cdot k_{SC} \cdot \mathbf{P}_x \cdot \mathbf{CS}_x, \quad (3.12)$$

$$\Delta \mathbf{Y}' = \frac{\lambda}{NA} \cdot k_{SC} \cdot \mathbf{P}_y \cdot \mathbf{CS}_y. \quad (3.13)$$

В этом случае смещение по оси x для каждой точки изображения описывается вектором (3.14), смещение по оси y - вектором (3.15):

$$\Delta \mathbf{X}' = \begin{pmatrix} \Delta x'_1 \\ \Delta x'_2 \\ \dots \end{pmatrix}, \quad (3.14)$$

$$\Delta \mathbf{Y}' = \begin{pmatrix} \Delta y'_{1} \\ \Delta y'_{2} \\ \dots \end{pmatrix}. \quad (3.15)$$

Полученные смещения представляют собой смоделированную поперечную aberrацию, вызванную фотограмметрической дисторсией. Координаты каждой точки на изображении определяются, в соответствии с формулами:

$$x' = x + \Delta x', \quad (3.16)$$

$$y' = y + \Delta y', \quad (3.17)$$

Таким образом, изображение сетки с учетом влияния дисторсии, описанной с помощью коэффициентов полиномов Цернике, формируется по вершинам сетки с учетом смещения координат вершин, вызванных влиянием дисторсии.

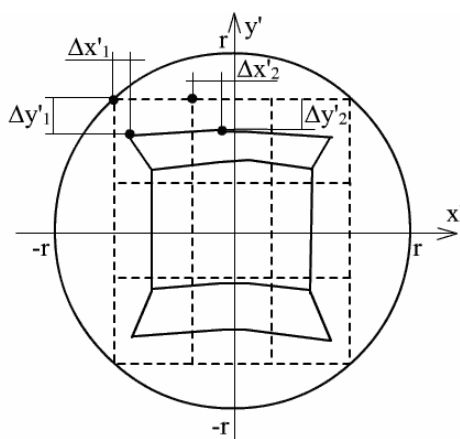
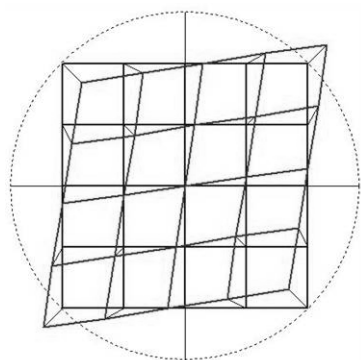
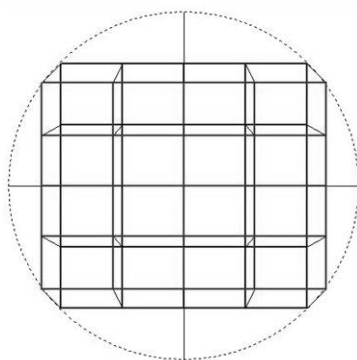


Рис. 3.3. Смещения узлов сетки

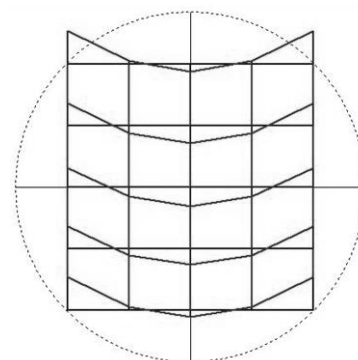
Смоделированные с помощью первичных полиномов картины дисторсии соответствуют картинам дисторсии, полученным профессором Русиновым М.М. при разложении дисторсии по степенным коэффициентам.



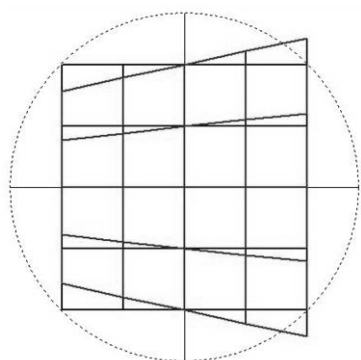
а) нецентрированная



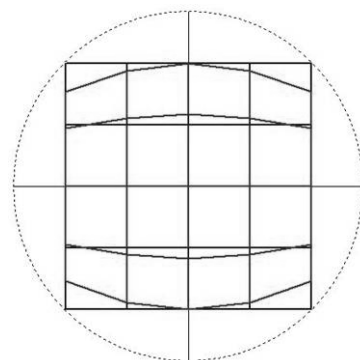
б) анаморфированная



в) параболическая



г) перспективная



д) полубочкообразная

Рис. 3.4. Картины дисторсии

Так, одновременное влияние коэффициентов первичного разложения S_{x11} и S_{y11} приводит к появлению, так называемой, нецентрированной дисторсии первого порядка (рис. 3.4. (а)); S_{x11} и S_{y11} – к анаморфированной дисторсии первого порядка (рис. 3.4. (б)); S_{y20} , S_{y00} и S_{y22} – к параболической дисторсии второго порядка (рис. 3.4. (в)); S_{y22} – к перспективной дисторсии так же второго порядка (рис. 3.4. (г)); S_{y11} и S_{y31} – к полуподушко или бочкообразной (в зависимости от знаков коэффициентов) дисторсии третьего порядка (рис. 3.4. (д)).

Однако, сравнив картины дисторсии для сечений по оси x и по оси y , нетрудно убедиться, что нечетные коэффициенты описывают искажение сетки неоднозначно и несимметрично, что делает затруднительным их использование в качестве параметров коррекции.

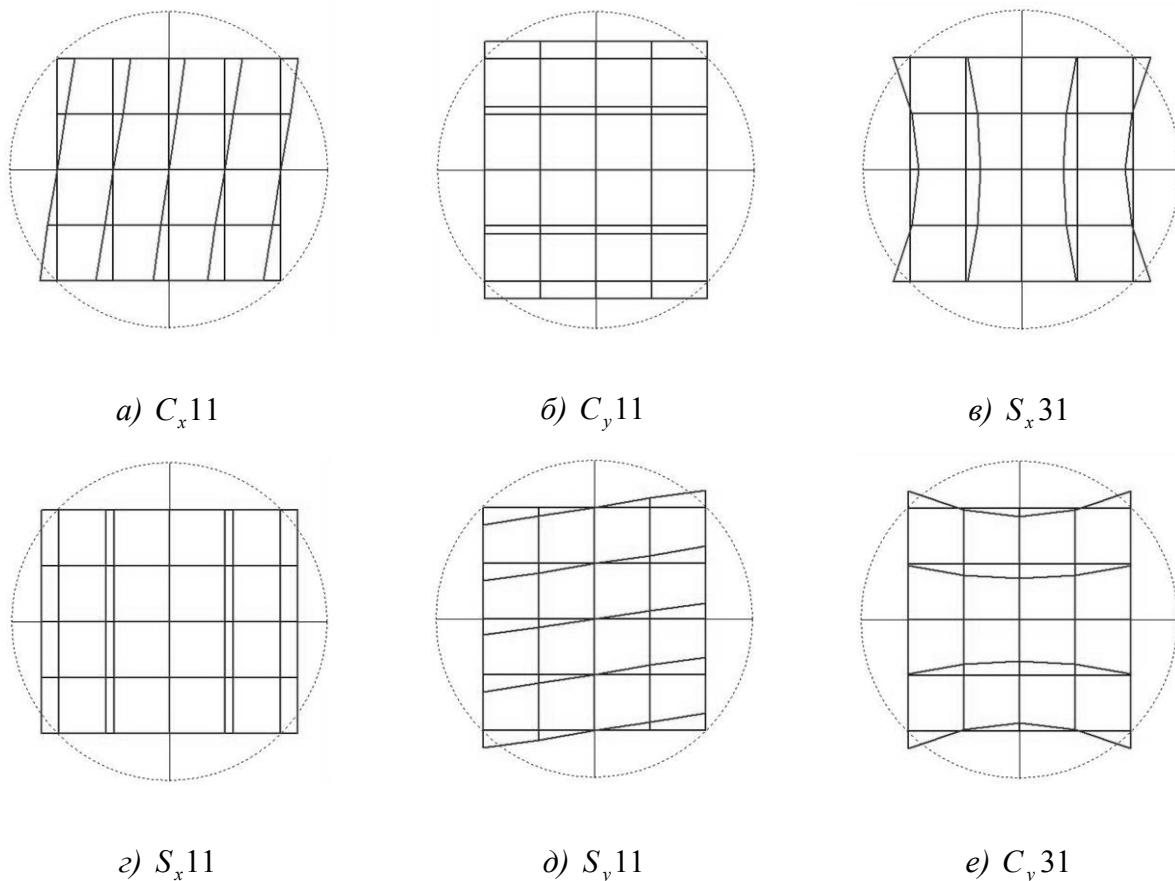


Рис. 3.5 Несимметричность базиса

Поэтому возникает необходимость создания базиса, однозначно описывающего отдельные компоненты дисторсии вне зависимости от направления рассматриваемого сечения.

Такой базис можно получить, если сопоставить выражение (3.18) для поперечных aberrаций при использовании первичного базиса и выражение (3.19) для поперечных aberrаций через глобальное разложение волновой aberrации по полиномам типа Цернике, включающее как центрированные, так и не центрированные члены:

$$\Delta x'_i \cong \sum_{k=0}^K P_{Ck} \cdot Cx_k + \sum_{k=1}^K P_{Sk} \cdot Sx_k, \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \rho_x} = \sum_{n=0}^p \sum_{m=0}^n c_{nm} \frac{\partial (R_n^m(\rho) \cos(m\varphi))}{\partial \rho_x} + \sum_{n=1}^p \sum_{m=1}^n s_{nm} \frac{\partial (R_n^m(\rho) \sin(m\varphi))}{\partial \rho_x}, \quad (3.19)$$

В результате преобразований связь между коэффициентами первичного и глобального разложения по полиномам Цернике можно записать в виде соотношений (3.20 – 3.25):

$$C_{0,k}^{1,-1} = 0,5(Cy_k^1 - Sx_k^1), \quad (3.20)$$

$$C_{0,k}^{1,0} = Cy_k^0, \quad (3.21)$$

$$C_{0,k}^{1,m} = 0,5(Cy_k^m + Sx_k^m), \text{ где } m = 1, 2, 3, \quad (3.22)$$

$$S_{0,k}^{1,-1} = -0,5(Cx_k^1 + Sy_k^1), \quad (3.23)$$

$$S_{0,k}^{1,0} = -Cx_k^0, \quad (3.24)$$

$$S_{0,k}^{1,m} = -0,5(Cx_k^m - Sy_k^m), \text{ где } m = 1, 2, 3. \quad (3.25)$$

При этом эти коэффициенты соответствуют влиянию центрированным и нецентрированным коэффициентам, вычисляемым в программе автоматизированного проектирования оптики во влиянии параметров на коэффициенты волновой аберрации.

Для решения прямой задачи – восстановления коэффициентов глобального разложения по измеренным значениям поперечной аберрации в каждом сечении необходимо решить систему линейных уравнений (3.26), и определить коэффициенты первичного базиса:

$$\mathbf{P}_x \cdot \mathbf{CS}_x = \Delta \mathbf{X}'. \quad (3.26)$$

Здесь \mathbf{P} – базисная матрица дисторсии, вектор значений – прошедший первичную обработку массив измеренных значений поперечных аберраций, а вектор неизвестных – набор косинусных и синусных коэффициентов первичного разложения в соответствующих сечениях.

Затем восстановить коэффициенты глобального разложения, применив формулы (3.27 – 3.34) для обратного перехода:

$$Cx_k^m = -S_{0,k}^{1,m}, \text{ где } m = 0, 2, 3, \quad (3.27)$$

$$Cx_k^1 = -S_{0,k}^{1,-1} - S_{0,k}^{1,1}, \quad (3.28)$$

$$Sx_k^1 = C_{0,k}^{1,1} - C_{0,k}^{1,-1}, \quad (3.29)$$

$$Sx_k^m = C_{0,k}^{1,m}, \text{ где } m = 2, 3, \quad (3.30)$$

$$Cy_k^m = C_{0,k}^{1,m}, \text{ где } m = 0, 2, 3, \quad (3.31)$$

$$Cy_k^1 = C_{0,k}^{1,-1} + C_{0,k}^{1,1}, \quad (3.32)$$

$$Sy_k^1 = S_{0,k}^{1,1} - S_{0,k}^{1,-1}, \quad (3.33)$$

$$Sy_k^m = S_{0,k}^{1,m}, \text{ где } m = 2, 3, \quad (3.34)$$

Необходимо отметить, что получившаяся система глобальных коэффициентов разложения дисторсии по полиномам ортогональна по зрачку и предмету. Эта ортогональность по зрачку может быть использована для расчета матрицы влияния параметров и имеет принципиальное значение: при использовании такого базиса получаем «эффективную» дисторсию, т.е. дисторсию, которая определяется не расстоянием от точки пересечения данного главного луча с плоскостью изображения до точки идеального изображения, а смещением, так называемого, энергетического пятна рассеивания. Именно это смещение, которое определяет фактическую дисторсию, определяется при помощи указанного ортогонального базиса.

Для вычисления коррекционных подвижек используется матрица влияния параметров, полученная из программы автоматизированного проектирования оптики. Составляется система уравнений:

$$A \cdot \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C \\ S \end{pmatrix}, \quad (3.35)$$

где вектором неизвестных является вектор коррекционных подвижек. Преимуществом такого подхода для решения данной задачи является то, что с помощью небольшого числа подвижек решается задача компенсации децентрированной дисторсии сразу по всему полю за одну итерацию

Глава 4. Анализ методики коррекции дисторсии проекционных оптических систем

В четвертой главе диссертационной работы анализируется предлагаемая методика автоматизации коррекции фотограмметрической дисторсии проекционных оптических систем на основе данных о реальных измерениях поперечных аберраций изготовленного объектива.

Для возможности анализа оптимальности методики необходимо по измеренным поперечным аберрациям в соответствии с разработанной математической моделью анализа децентрировок третьего и более высоких порядков определить коррекционные подвижки и провести повторное измерение после учета подвижек. Повторное измерение показывает, что дисторсия исправлена.

Непосредственно методику коррекции фотограмметрической дисторсии можно описать следующим образом:

- 1) производятся измерения, вычисляются коэффициенты глобального разложения, картина дисторсии восстанавливается по этим коэффициентам.
- 2) после вычисления требуемых подвижек (dX , dY) в мм их отработывает оператор при помощи микрометрических винтов, заложенных в

конструкцию оправы данной линзы. Точность обработки подвижек $\sim \pm 1$ микрон.

3) после обработки подвижек дисторсия снова измеряется, результат измерений приведен в третьей колонке таблицы 4.1. (Обработка подвижек выполняется только один раз).

В ходе работы на основе разработанной математической модели был создан программный комплекс, и была проведена экспериментальная апробация предложенной в работе методики на нескольких экземплярах проекционного объектива фирмы LG-electronics, предназначенного для изготовления LCD-панелей.

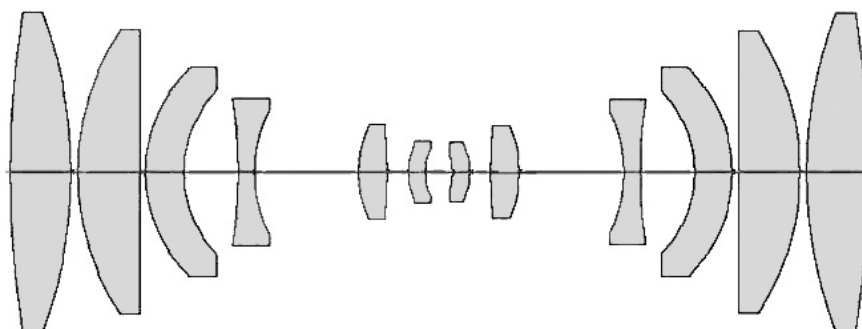


Рис. 4.1. Оптическая схема корректируемого объектива

В таблице 4.1 приведены величины максимальной дисторсии (из всех точек по полю). Прекрасно видно, что после коррекции дисторсия уменьшается кардинально, несмотря на возможную погрешность в обработке подвижек.

Таблица 4.1. Значения дисторсии и компенсационных подвижек (dX , dY).

Объективы (номер образца)	<i>max</i> дисторсия до	<i>max</i> дисторсия после	компенса- ционный узел	dX (мм)	dY (мм)
	компенсации (мкм)				
1	5.000	0.600	5-я линза	-0.003	-0.008
2	9.100	1.000	5-я линза	-0.006	-0.010
3	10.8	0.84	5-я линза	0.0	-0.021

Допустимая максимальная дисторсия составляет всего лишь 2 микрона. После компенсации этот допуск выполнен.

Заключение

Итак, в данной диссертационной работе:

1. Предложена методика расчета реальных децентрировок поверхностей с использованием разработанного математического аппарата квазипараксиальной оптики.
2. Разработан математический аппарат расчета изображений автоколлимационных точек поверхностей через ту часть децентрированной оптической системы, которая находится между автоколлиматором и измеряемой поверхностью.

3. Разработан математический аппарат анализа дисторсии по данным измерения поперечных aberrаций реальной оптической системы.
4. Разработан алгоритм компенсации децентрировок с учетом результатов анализа измерений дисторсии и таблицы влияния параметров оптической системы на коэффициенты разложения aberrаций по полиномам Цернике.
5. Предложена методика коррекции дисторсии проекционных оптических систем, которая позволяет выдержать допуски на максимально допустимую дисторсию.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Ежова, К.В. Анализ компенсационных децентрировок поверхностей в оптической системе на основе методов Гауссовой оптики / К.В. Ежова, Н.Б. Вознесенский, Н.Д. Толстоба // Сборник трудов VI международной конференции «Прикладная оптика-2004». Компьютерные технологии в оптике / под ред. М.А. Гана, - Санкт-Петербург. – 2004. – Т.3. - С.108-112.
2. Ежова, К.В. Разработка алгоритмов для компенсации децентрировок поверхностей в оптической системе на основе методов Гауссовой оптики. // Вестник II межвузовской конференции молодых учёных: сб. научн. трудов / под ред. В.Л. Ткалич, - СПб.: СПбГУИТМО. – 2005. - С.51-58.
3. Ежова, К.В. Применение алгоритмов для анализа компенсационных децентрировок и наклонов поверхностей в оптической системе на основе гауссовой оптики / К.В. Ежова, Н.Б. Вознесенский // Труды четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2005» / Под ред. Проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова, СПб: СПбГУИТМО. - 2005. - С.132.
4. Ежова, К.В. Математическое моделирование фотограмметрической дисторсии // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – Вып. 26. – С.235-239.