

На правах рукописи

Попов Михаил Вячеславович

**КОМПАКТНЫЕ ПАНКРАТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТИВЫ
С БОЛЬШИМ ПЕРЕПАДОМ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ**

Специальность 05.11.07 –
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

2007

Работа выполнена на кафедре прикладной оптики Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Научный руководитель	доктор технических наук Бездидько Сергей Николаевич
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор Рожков Олег Владимирович кандидат технических наук Шмыга Валерий Владимирович
Ведущая организация	ФГУП «Дом оптики «ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова»

Защита диссертации состоится « 24 » мая 2007 г. в 10.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, К-64, Гороховский пер., 4, МИИГАиК, ауд. 321.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК.

Автореферат разослан «20 » апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Климков Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Панкратические системы в настоящее время используются во многих областях науки и техники, где необходимо плавное изменение увеличения. Они получили широкое распространение в кинематографии и телевидении, благодаря возможности непрерывного изменения масштаба изображения. Современный телевизионный панкратический объектив представляет собой сложный оптический прибор, в котором используются различные достижения технологического прогресса: шаговые прецизионные микродвигатели – для перемещения подвижных компонентов объектива по сложным траекториям, специальные низкодисперсионные стекла – для эффективного исправления хроматических aberrаций, асферические поверхности и дифракционные элементы – для повышения качества формируемого изображения.

Расчетом и проектированием панкратических систем занимались такие отечественные и зарубежные ученые, как Л. Бергштейн, А.Д. Кларк, Д.С. Волосов, И.И. Пахомов, М.Г. Шпякин. Вопросы теории расчета панкратических систем в паракиальной области получили развитие в трудах К. Танаки, М. Оскотского. Синтезу панкратических объективов в области aberrаций третьих порядков посвящены работы Б. Стоуна, Р. Шеннона и С. Парка.

Развитие в последние десятилетия цифровой видеотехники привело к распространению такого вида оптико-электронных приборов, как любительские видеокамеры и видеокамеры систем наблюдения. Подобные приборы являются разновидностью телевизионных систем. К панкратическим объективам для данного вида видеокамер предъявляют специфические требования: высокая светосильность, широкоугольность, большой перепад фокусных расстояний (выше 10^X), компактные размеры, телецентрический ход главного луча в пространстве изображений. Четкость формируемого видеокамерой изображения определяется качеством изображения, создаваемого объективом на ПЗС-матрице и числом строк и элементов развертки телевизионного сигнала. Новый телевизионный стандарт ТВЧ (телевидение высокой четкости) обладает почти вдвое большим числом строк развертки, по сравнению с нынешним телевидением стандартного качества. Таким образом, требования к качеству коррекции aberrаций объективов для камер данного стандарта существенно возросли. Соответственно, структура оптической схемы панкратического объектива для данного вида видеокамер будет существенно отличаться от используемых в вещательных и профессиональных телевизионных камерах.

Отсюда следует актуальность разработок методик расчета компактных панкратических объективов с большим перепадом фокусных расстояний, а также исследование и совершенствование методов их проектирования. При этом необходимо установить оптимальную структуру паракиальной схемы

объектива, которая позволит обеспечить совокупность требуемых характеристик. Также необходимо разработать и реализовать алгоритмы автоматизированного синтеза реальной системы панкратического объектива в области аббераций третьих порядков с учетом аббераций высших порядков. Этим вопросам посвящена данная диссертационная работа, чем и определяется ее актуальность.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка методики и алгоритмов расчета панкратических объективов, обеспечивающих минимизацию габаритов и увеличение перепада фокусных расстояний.

Задачи исследования

1. Разработка методики параксиального расчета компактных панкратических объективов с механической компенсацией сдвига плоскости изображения. Данная методика должна обладать универсальностью, т.е. возможностью ее применения независимо от структуры системы, количества и расположения подвижных и неподвижных компонентов, формы траектории движения компонентов.
2. Исследование структурных схем панкратических объективов с целью определения оптимальных областей их применения, максимальных значений перепада фокусных расстояний и минимальных габаритных размеров.
3. Разработка и практическая реализация алгоритмов автоматизированного синтеза панкратических систем в области аббераций первого и третьего порядков с учетом аббераций высших порядков.
4. Расчет двух компактных панкратических объективов с большим перепадом фокусных расстояний, один из которых предназначен для видеокамеры стандартного качества (SDTV), а другой – для видеокамеры ТВЧ (HDTV).

Методы исследования

1. Аналитические методы, основанные на применении аппарата геометрической и матричной оптики.
2. Компьютерное моделирование алгоритмов параксиального расчета панкратических систем с помощью пакета символьных вычислений «Maple 9.5».
3. Использование пакета символьных вычислений «Maple 9.5» для реализации решения систем нелинейных уравнений, осуществления многомерной оптимизации в заданной области методом штрафных функций, определения основных параметров (R , W , π , C) параксиальных (тонких) компонентов панкратического объектива и введения конечных толщин.
4. Графо-аналитический метод выбора марок стекол для синтеза тонких компонентов и последующего перехода к компонентам конечной толщины.

5. Использование программного комплекса для оптических расчетов «ZEMAX» при проведении автоматизированной коррекции аберраций и анализа качества изображения.

Научная новизна диссертации

1. Разработана методика расчета панкратических объективов и определены условия получения системы с минимальными габаритами при двух подвижных компонентах.
2. Проведено исследование структурных схем панкратических объективов, состоящих из 4 и 5 групп. Определены оптимальные схемы для получения компактных объективов с большим перепадом фокусных расстояний.
3. Разработан алгоритм автоматизированного расчета основных параметров (P , W , π , C) параксиальных (тонких) компонентов панкратического объектива с использованием методов оптимизации в многомерном пространстве.
4. Разработаны методы синтеза (выбора марок стекол) тонких компонентов с требуемыми аберрационными характеристиками типа: двойной склеенный компонент, двойной несклеенный компонент, одиночная линза и двойной склеенный компонент, а также выполнено их компьютерное моделирование.
5. Разработан и реализован алгоритм введения конечных толщин в синтезированный тонкий компонент методом оптимизации с использованием штрафных функций.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Разработанная методика расчета параксиальных схем компактных панкратических объективов с большим перепадом фокусных расстояний.
2. Полученная классификация параксиальных схем четырех- и пятигрупповых панкратических объективов по функциональному назначению в зависимости от структурной формулы.
3. Метод расчета панкратических систем в тонких компонентах в области аберраций первого и третьего порядков.
4. Разработанные методы синтеза реальных компонентов панкратического объектива с заданными аберрационными свойствами.
5. Оптические схемы 10^X и 30^X панкратических объективов, рассчитанные в рамках данной диссертационной работы.

Практическая ценность работы

1. Разработанная методика расчета панкратических систем позволяет рассчитывать панкратические системы с любым числом подвижных и неподвижных компонентов. Разработаны условия, необходимые для минимизации габаритов системы и увеличения перепада фокусных расстояний, которые могут быть применены во многих типах оптических систем.
2. Результаты исследования различных схем четырех- и пятигрупповых панкратических объективов позволяют определить оптимальные

- структурные схемы для расчета различных типов панкратических объективов в зависимости от требуемых характеристик.
3. Разработанные алгоритмы для расчета в области аберраций первого и третьего порядков позволяют автоматизировать процесс синтеза реальной системы по известным параметрам параксиальной схемы панкратического объектива.
 4. Рассчитанные системы 10^X и 30^X объективов обладают компактными размерами и по совокупности основных оптических характеристик и качеству превосходят существующие аналоги.
 5. Представленная диссертационная работа охватывает все основные этапы расчета панкратических объективов: формулирование требований к основным оптическим характеристикам и качеству объектива в зависимости от его функционального назначения; определение его структурной схемы; расчет в параксиальной области; синтез стартовой схемы на основе аберраций первого и третьего порядков; автоматизированная коррекция аберраций в программном комплексе для оптических расчетов. Основные разработанные методы и алгоритмы моделировались с помощью математического программного обеспечения, это позволяет значительно сократить время, необходимое для разработки панкратических систем.

Личный вклад соискателя

Все результаты, выносимые на защиту, получены лично автором. Автор принимал участие в постановке целей и задач диссертационной работы, определения их возможных путей решения, а также обсуждении и оценке полученных результатов.

Достоверность работы

Достоверность результатов работы подтверждается моделированием полученных закономерностей и алгоритмов с помощью математического пакета вычислений «Maple 9.5». Рассчитанные параксиальные и реальные панкратические системы моделировались в программном комплексе для оптических расчетов «ZEMAX», результаты моделирования в обоих случаях совпадали.

Апробация работы

Основные результаты диссертации обсуждались:

- на конференции «Novel Optical Systems Design and Optimization VII», 2 августа 2004 г., Денвер, США;
- на конференции «Прикладная оптика – 2004» международного оптического конгресса «Оптика XXI век», 18-21 октября 2004 г., Санкт-Петербург;
- на 1-й научно-практической конференции «Young Opticians Meeting YOM-2005», 30 сентября-2 октября 2005 г., Москва;
- на научно-практической конференции 2-го международного форума «Оптика 2006», 12-14 декабря 2006 г., Москва.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, из них одна – заявка на патентование изобретения.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 103 наименований и двух приложений, содержит 131 страницу основного текста, 49 рисунков и 30 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены вопросы истории и развития панкратических объективов, используемых в телевидении. Отмечен вклад отечественных и зарубежных ученых, занимавшихся расчетом и проектированием панкратических систем. Описываются тенденции развития панкратических объективов для телевизионных и видеокамер, обосновывается актуальность работы, формулируются основные цели и задачи исследования. Приводится краткое описание работы, основных результатов и практической ценности.

В первой главе диссертации приводятся основные оптические характеристики панкратических объективов, которыми являются: заднее фокусное расстояние объектива, перепад фокусных расстояний, угловое поле и относительное отверстие. Современные телевизионные и видеокамеры делятся по функциональному назначению на вещательные, профессиональные и любительские. Основываясь на технической документации Европейского Вещательного Союза, приводятся требования к основным характеристикам панкратических объективов для видеокамер в зависимости от их типа, а также специфические требования: к величине заднего фокального отрезка, коэффициенту пропускания, распределению освещенности и телецентричности.

Уровень коррекции аберраций объектива определяется стандартом телевидения, в частности, количеством строк развертки. Приводятся требования к коррекции дисторсии, хроматизма положения и увеличения, а также к функции передачи модуляции. Следует отметить, что максимальная пространственная частота, которую должен разрешать объектив, существенно увеличилась в связи с появлением нового телевизионного стандарта HDTV (ТВЧ).

Обзор типовых оптических схем панкратических объективов составлен по результатам анализа более 200 патентов патентного ведомства США, из которых отобрано 17 патентов. Все представленные в них объективы представляют собой четырех или пятигрупповые системы, так как с помощью двух и трехгрупповых панкратических систем невозможно получить большой перепад фокусных расстояний, требуемый для телевизионных и видеокамер, без значительного увеличения габаритных размеров.

Расчет систем переменного увеличения или, в частности, панкратических объективов можно разделить на несколько основных этапов:

- 1) Параксиальный расчет;

- 2) Синтез реальной системы;
- 3) Оптимизация.

Расчету панкратических систем в паракиальной области посвящено множество работ. Некоторые методы приведены в данной главе. Однако в них не уделяется внимание вопросам минимизации габаритов панкратических объективов и увеличения перепада фокусных расстояний. Кроме того, во многих работах накладываются ограничения на структуру системы. Синтез реальной системы на основе известной паракиальной для панкратических объективов осложняется тем, что во всем диапазоне изменения фокусных расстояний требуется обеспечить высокий уровень коррекции aberrаций.

Таким образом, задача совершенствования и адаптации методики паракиального расчета панкратических объективов с механической компенсацией для случая компактных систем с большим перепадом фокусных расстояний, а также разработка и реализация алгоритмов автоматизированного синтеза панкратических систем в области aberrаций третьего порядка с учетом aberrаций высших порядков является весьма актуальной. В соответствии с вышесказанным сформулированы основные задачи работы.

Во второй главе описывается методика расчета панкратических систем в паракиальной области, приводятся условия уменьшения габаритов системы и увеличения перепада фокусных расстояний, а также результаты исследования различных структурных схем панкратических объективов.

Основной задачей паракиального расчета является определение на основе технического задания количества паракиальных компонентов, величин их оптических сил и расстояний между ними. Для расчета панкратической системы необходимо также определить количество подвижных групп и рассчитать законы изменения воздушных промежутков между ними. В связи со спецификой работы, панкратический объектив для видеокамер имеет первый неподвижный компонент. Тогда фокусное расстояние четырехгруппового объектива можно записать в виде:

$$f = f_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4,$$

где f_1 – фокусное расстояние первой группы,

m_2, m_3, m_4 – поперечные увеличения второй, третьей и четвертой групп.

Перепад фокусных расстояний объектива определяется изменением поперечных увеличений этих групп. Для обеспечения неподвижности плоскости изображения необходимо, как минимум, две перемещающиеся группы, одна из которых движется по нелинейной траектории. Обзор современных панкратических объективов, представленный в главе 1 данной работы, подтверждает, что количество подвижных групп редко больше двух, так как это приводит к удорожанию объектива, увеличению массы и габаритов конструкции. Подвижными могут быть расположенные рядом вторая и третья группы (рисунок 2.1), тогда m_4 постоянно. Либо вторая и четвертая группы, разделенные неподвижной третьей (рисунок 2.3).

Рассмотрим панкратическую систему, изображенную на рисунке 2.1. расстояние между оптически сопряженными точками O и O' должно быть постоянным в процессе перемещения компонентов:

$$L = a + d + a' = a_0 + z_1 + d_0 - z_1 + z_2 + a'_0 - z_2 = L_0.$$

Для оптически сопряженных точек с помощью гауссовых скобок можно записать выражение:

$$[a_0 + z_1, -\varphi_1, d_0 - z_1 + z_2, -\varphi_2, a'_0 - z_2] = 0, \quad (2.1)$$

$$\text{где } a = a_0 + z_1, \quad d = d_0 - z_1 + z_2, \quad a' = a'_0 - z_2.$$

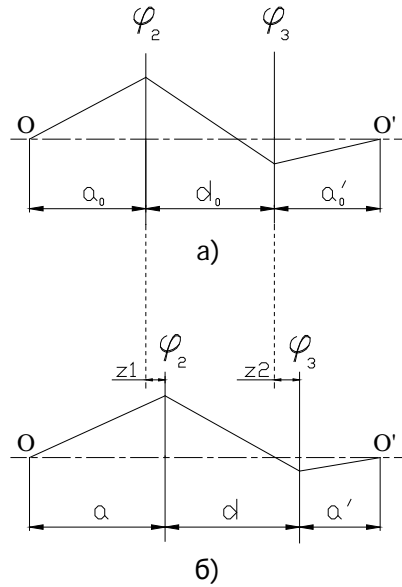


Рисунок 2.1. Оптическая схема панкратической системы:
а) – начальное положение; б) – произвольное положение

Выполнение данного условия обеспечивает неподвижность предметной точки O и ее изображения O' в процессе перемещения компонентов. Полученное выражение представляет собой закон перемещения компонентов, выраженный в неявном виде.

Поперечные увеличения компонентов в произвольном положении:

$$m_2 = \frac{1}{[a, -\varphi_2]} = \frac{1}{z_1 \cdot (-\varphi_2) + \frac{1}{m_{20}}}; \quad (2.2a)$$

$$m_3 = [a', -\varphi_3] = z_2 \cdot \varphi_3 + m_{30}, \quad (2.2б)$$

где φ_2, φ_3 – оптические силы компонентов,

m_{20}, m_{30} – увеличения компонентов в начальном положении.

Раскрыв гауссовы скобки и подставив эти выражения, получим закон перемещения компонентов в следующем виде:

$$F(z_1, z_2) = \frac{\varphi_2 z_1^2 + \left(-\frac{1}{m_{20}} - \varphi_2 d_0 + 1\right) z_1 + \frac{d_0}{m_{20}} + a_0}{-z_1 \varphi_2 + \frac{1}{m_{20}}} + \frac{\varphi_3 z_2^2 + (m_{30} - 1) z_2 + a'_0}{z_2 \varphi_3 + m_{30}} = 0. \quad (2.3)$$

Закон перемещения компонентов (2.3) представляет собой кривую на плоскости (z_1, z_2) . Известно, что плоская кривая имеет так называемые особые точки. Для того, чтобы функция имела особую точку второго порядка

в точке с координатами (z_1^0, z_2^0) , должны выполняться следующие условия: первые производные $F(z_1, z_2)$ в особой точке равны нулю и хотя бы одна из вторых производных отлична от нуля. Эти условия выполняются при $m_{20} = m_{30} = -1$.

Поведение кривой в окрестности особой точки определяется в зависимости от знака выражения:

$$g = \frac{\partial^2 F(z_1^0, z_2^0)}{\partial z_1^2} \cdot \frac{\partial^2 F(z_1^0, z_2^0)}{\partial z_2^2} - \left(\frac{\partial^2 F(z_1^0, z_2^0)}{\partial z_1 \partial z_2} \right)^2 = 4\varphi_2\varphi_3. \quad (2.4)$$

Возможны два случая:

- 1) $g < 0 \Leftrightarrow \text{sign}(\varphi_2) = -\text{sign}(\varphi_3)$, компоненты обладают противоположными по знаку оптическими силами. Кривая $F(z_1, z_2)$ в особой точке имеет точку самопересечения или узел.
- 2) $g > 0 \Leftrightarrow \text{sign}(\varphi_2) = \text{sign}(\varphi_3)$, в этом случае знаки оптических сил компонентов одинаковые, особая точка является изолированной точкой – ни в самой точке, ни в ее окрестности не существует кривой.

Если первый компонент перемещается по линейной траектории, тогда для компенсирования сдвига плоскости изображения второй компонент должен двигаться по нелинейной траектории вида:

$$z_2(z_1) = \frac{\varphi_2 z_1^2}{2(\varphi_2 z_1 + 1)} \pm \frac{z_1 \sqrt{\varphi_2^2 \varphi_3^2 z_1^2 - 4\varphi_2^2 \varphi_3 z_1 - 4\varphi_2 \varphi_3}}{2\varphi_3 (\varphi_2 z_1 + 1)}.$$

Поперечное увеличение системы:

$$M(z_1) = m_2 \cdot m_3 = - \left(\frac{\varphi_2 \varphi_3 z_1^2 - 2\varphi_2 z_1 - 2}{2(\varphi_2 z_1 + 1)^2} \pm \frac{z_1 \sqrt{\varphi_2^2 \varphi_3^2 z_1^2 - 4\varphi_2^2 \varphi_3 z_1 - 4\varphi_2 \varphi_3}}{2(\varphi_2 z_1 + 1)^2} \right).$$

Расстояние между компонентами:

$$d(z_1) = \frac{2}{\varphi_2} + \frac{2}{\varphi_3} - z_1 + \frac{\varphi_2 z_1^2}{2(\varphi_2 z_1 + 1)} \pm \frac{z_1 \sqrt{\varphi_2^2 \varphi_3^2 z_1^2 - 4\varphi_2^2 \varphi_3 z_1 - 4\varphi_2 \varphi_3}}{2\varphi_3 (\varphi_2 z_1 + 1)}.$$

На рисунке 2.2 сплошной линией показаны значения $M(z_1)$ и $d(z_1)$, соответствующие знаку «+» в этих выражениях. Пунктиром – знаку «-».

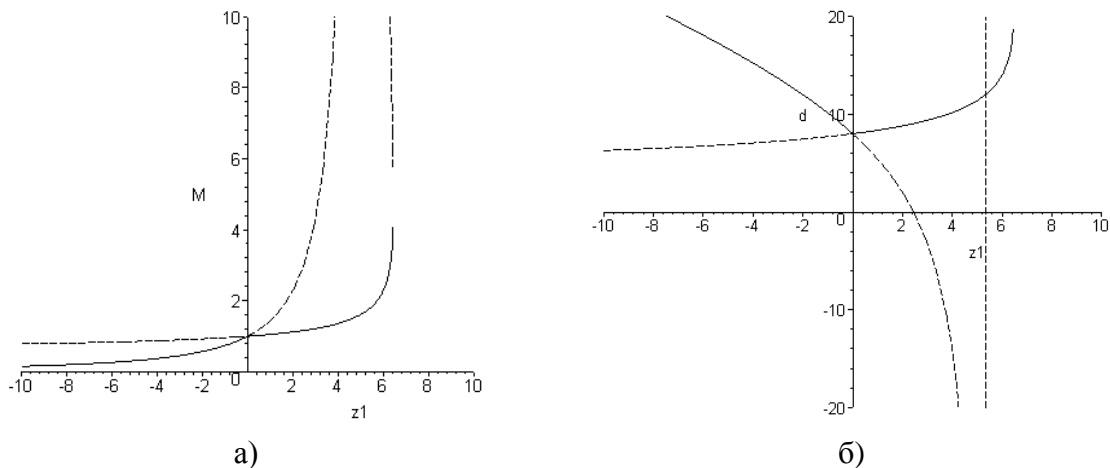


Рисунок 2.2. График изменения:

а) – поперечного увеличения системы $M(z_1)$; б) – расстояния между компонентами $d(z_1)$

Использование точки самопересечения при расчете панкратических систем позволяет произвести «обмен решениями» (рисунок 2.2), то есть второй компонент в таком случае двигается по траектории, соответствующей одному решению, а в особой точке меняет на траекторию, соответствующую второму решению. Перепад увеличений при такой «составной» траектории возрастает (рисунок 2.2. а)), а также траектория движения второго компонента из сложной возвратно-поступательной преобразуется в поступательную (рисунок 2.2. б)).

Рассуждая аналогичным образом, был рассмотрен случай, когда подвижные группы разделены неподвижной (рисунок 2.3).

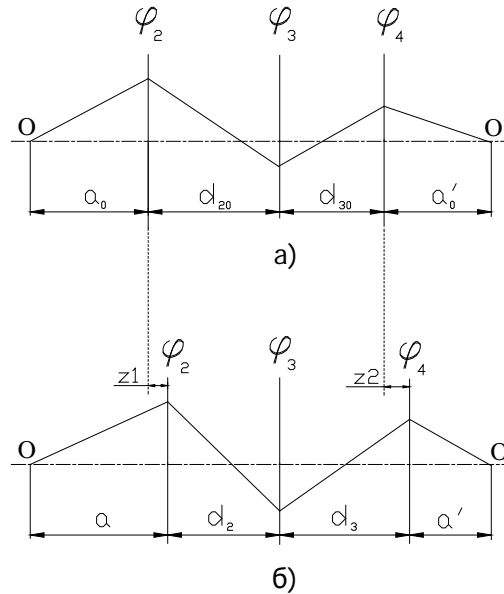


Рисунок 2.3. Оптическая схема панкратической системы:
а) – начальное положение; б) – произвольное положение

Записав выражения, подобные (2.1) и (2.2) для данного случая, получим закон перемещения компонентов в следующем виде:

$$F(z_1, z_2) = \frac{-\frac{(m_{30}-1)(z_1\varphi_2 m_{20}-1)}{m_{20}\varphi_3 m_{30}} + \frac{z_1(z_1\varphi_2 m_{20}-1)}{m_{20}} + z_1 m_{20}}{-\frac{z_1\varphi_2 m_{20}-1}{m_{20}m_{30}} - \varphi_3 \left(\frac{z_1(z_1\varphi_2 m_{20}-1)}{m_{20}} + z_1 m_{20} \right)} + \frac{(z_2\varphi_4 + m_{40}) \left(z_2 - \frac{m_{30}-1}{\varphi_3} \right) - \frac{z_2}{m_{40}}}{z_2\varphi_4 + m_{40}}$$

Данная кривая также имеет особую точку при условии $m_{20} = m_{40} = -1$. Поведение кривой в окрестности особой точки определяется в зависимости от знака выражения (2.4) для данной системы:

$$g = 4\varphi_2 m_{30}^2 \varphi_4.$$

Таким образом, наличие неподвижного компонента не повлияло ни на условия наличия особой точки, ни на ее тип. Как и в предыдущем случае, тип особой точки определяется знаками оптических сил подвижных компонентов. Траектория движения четвертого компонента:

$$z_2(z_1) = \frac{m_{20} z_1 \left(z_1 m_{20} \varphi_1 \varphi_3 \pm \sqrt{z_1^2 m_{20}^2 \varphi_1^2 \varphi_3^2 - 4z_1^2 \varphi_1^2 \varphi_2 \varphi_3 m_{20}^2 - 4z_1 \varphi_1^2 \varphi_3 - 4\varphi_1 \varphi_3} \right)}{2\varphi_3 (z_1^2 m_{20} \varphi_1 \varphi_2 + z_1 \varphi_1 + 1)}.$$

Поперечное увеличение системы:

$$M(z_1) = \frac{m_{20} \left\{ -\varphi_1 \varphi_3 m_{20}^2 z_1^2 + 2(m_{20} \varphi_1 \varphi_2 z_1^2 + z_1 \varphi_1 + 1) \mp K \right\}}{2(m_{20} \varphi_1 \varphi_2 z_1^2 + z_1 \varphi_1 + 1)^2},$$

где $K = \sqrt{\varphi_1 \varphi_3 m_{20}^2 z_1^2 (\varphi_1 \varphi_3 m_{20}^2 z_1^2 - 4\varphi_1 \varphi_2 m_{20} z_1^2 - 4\varphi_1 z_1 - 4)}$.

Расстояние между компонентами:

$$d_2(z_1) = \frac{2m_{30} \varphi_3 - \varphi_2 (m_{30} \varphi_3 z_1 - m_{30} + 1)}{m_{30} \varphi_2 \varphi_3};$$

$$d_3(z_1) = \frac{z_1 \varphi_2 (m_{30} \varphi_3 z_1 - m_{30} + 1) - m_{30} + 1}{\varphi_3 (m_{30} \varphi_2 \varphi_3 z_1^2 + z_1 \varphi_2 + 1)} - \frac{z_1 \varphi_2 \{m_{30} \varphi_3 z_1 (m_{30} - 4) - 4\} \pm K - 4}{\varphi_4 \{(m_{30} \varphi_3 z_1 (m_{30} - 2) - 2) \pm K - 2\}}.$$

Полученные результаты были использованы для исследования различных структурных схем панкратических объективов. Исследование проводилось следующим образом: с помощью математического пакета «Maple 9.5» были составлены программы, содержащие вышеизложенную методику расчета для различных типов систем. Затем для каждого из вариантов выбирались оптические силы компонентов таким образом, чтобы полученная система обладала максимальными перепадом фокусных расстояний M , линейным полем в пространстве изображений y' , минимальными длиной L , диафрагменным числом системы k и углом наклона главного луча. Структурная формула системы формируется по следующим принципам: латинской буквой P обозначается группа, имеющая положительную оптическую силу (P – positive), буквой N – группа, имеющая отрицательную оптическую силу (N – negative). Черта над буквой обозначает, что данная группа подвижна. Прямая черта показывает, что группа движется по прямолинейной траектории, волнистая – по нелинейной. Параметры наиболее удачных систем были отмасштабированы при условии $f'_{\min} = 1$ и приведены в таблице (2.1).

Таблица 2.1.

Структурная формула системы	Перепад фокусных расстояний, M	Линейное поле в пространстве изображений, $2y'$	Длина системы, L	Диафрагменное число системы, k
$\overline{PN}P\overline{P}$	17.5^x	1.0	16.3	1.6–3.5
$\overline{PN}P\overline{N}$	15.5^x	1.0	11.9	1.7–3.9
$\overline{PN}N\overline{P}$	28.3^x	0.6	20.9	1.8–4.2
$\overline{PN}P\overline{P}$	30.8^x	1.4	18.3	1.6–3.7
$\overline{PN}N\overline{P}$	37.8^x	1.0	22.5	1.7–4.4
$\overline{PN}P\overline{N}$	25^x	0.6	11.4	1.95–4.9
$\overline{PN}P\overline{N}P$	26.3^x	1.2	26.3	1.7–3.7

Для расчета компактных панкратических объективов с большим перепадом фокусных расстояний наиболее подходят системы $\overline{PN}P\overline{P}$ или $\overline{PN}P\overline{N}$. Основные оптические характеристики и другие параметры рассчитанных параксиальных схем 30^x и 10^x объективов приведены в таблице (2.2).

Таблица 2.2. Основные параметры параксиальных схем 30^x и 10^x объективов

Параметр	30^x объектив ($\overline{P\bar{N}P\bar{P}}$)	10^x объектив ($\overline{P\bar{N}P\bar{N}}$)
Фокусное расстояние f' , мм	2.2 – 66.9	4.2 – 48.1
Перепад фокусных расстояний, M	30.8^x	11.3^x
Линейное поле в пространстве изображений $2y'$, мм	2.7	6.0
Диафрагменное число k	1.6 – 4.7	1.68 – 3.9
Длина системы L , мм	39.8	50.57
Угол наклона главного луча α	$0.36^\circ - 3.12^\circ$	$6.27^\circ - 8.24^\circ$
Фокусные расстояния компонентов, мм	$f_1 = 26, f_2 = -2.9,$ $f_3 = 11, f_4 = 10$	$f_1 = 32, f_2 = -5.3,$ $f_3 = 9.3, f_4 = -20$

В третьей главе описан переход от рассчитанных во второй главе 30^x и 10^x параксиальных систем к системам с реальными компонентами конечной толщины. Такой переход для каждой системы осуществлен в три этапа.

На первом этапе, исходя из условий минимизации аберраций первого и третьего порядков всего объектива, рассчитаны требуемые аберрационные свойства отдельных компонентов параксиальной схемы. Для имеющейся параксиальной схемы панкратического объектива получено выражение, определяющее зависимость аберрации третьего порядка от основных параметров тонких компонентов для любого луча при любом требуемом фокусном расстоянии. Суммарная аберрация третьего порядка разделена на две составляющие, определяющие пятно рассеяния dy_p и дисторсию dy_{dist} . Решением системы из восьми уравнений для тонких компонентов были получены значения основных параметров P, W , которые при заданных значениях параметра π соответствуют требуемым значениям dy_p или dy_{dist} для восьми различных лучей. Ввиду очевидной малости числа свободных параметров, полученные значения тонких компонентов были использованы в качестве начальной точки для дальнейшей оптимизации системы и обеспечения требуемых значений дисторсии и пятна рассеяния в области аберраций третьего порядка. Для двух лучей одного полевого пучка в меридиональной плоскости пятно рассеяния определено в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned}
 P_{уатно}(m_{зр1}, m_{зр2}) &= \max[dy_p(m_{зр1}), dy_p(m_{зр2}), 0] - \min[dy_p(m_{зр1}), dy_p(m_{зр2}), 0] = \\
 &= \frac{1}{2} |dy_p(m_{зр1}) - dy_p(m_{зр2})| + \frac{1}{4} |dy_p(m_{зр1}) + dy_p(m_{зр2}) + |dy_p(m_{зр1}) - dy_p(m_{зр2})|| + \\
 &+ \frac{1}{4} |-dy_p(m_{зр1}) - dy_p(m_{зр2}) + |dy_p(m_{зр1}) - dy_p(m_{зр2})||,
 \end{aligned}$$

где $m_{зр1}, m_{зр2}$ – координаты лучей на зрачке. Ограничив диаметр пятна рассеяния и дисторсию для двух полей при пяти значениях фокусного расстояния и проведя оптимизацию методом штрафных функций для

нескольких начальных точек, были получены значения основных параметров P , W , π , соответствующие требуемому качеству оптической системы.

Аналогичным образом была проведена оптимизация системы в области хроматических aberrаций первого порядка и определены основные параметры C тонких компонентов.

На втором этапе с помощью специальных методик были синтезированы тонкие компоненты с определенными ранее aberrационными параметрами P , W , π и C . Были реализованы алгоритмы синтеза компонентов в виде двойного склеенного компонента, двойного несклеенного компонента, одиночной линзы и двойного склеенного компонента.

Основной проблемой при синтезе двухлинзового склеенного компонента является то, что его параметры P и W при заданном C заранее связаны между собой определенной зависимостью, что усложняет получение требуемого сочетания этих параметров. В работе реализован графо-аналитический метод выбора марок стекол, который при заданном C обеспечивает ближайшее к требуемому сочетание P и W , учитывая значение параметра π . Для расчета необходимо задать требуемые основные параметры P , W , C и параметры n, ν одного из стекол. При подстановке этих данных в уравнение связи между P и W получено выражение, связывающее показатель преломления и коэффициент дисперсии Аббе для второго стекла вида:

$$Av_3^5 + Bv_3^4 + Cv_3^3 + Dv_3^2 + Ev_3 + F = 0, \quad (3.1)$$

где $A, B, C, D, E, F = f_{1-6}(n_3, \bar{P}, \bar{W}, \bar{C}, n_2, \nu_2)$;

n_2, n_3, ν_2, ν_3 – показатели преломления и коэффициенты Аббе соответственно первой и второй линз компонента.

Полученная функция (3.1) наносится на карту стекол (линии 1, рисунок 3.1). Чем ближе стекло (точка 3, рисунок 3.1) к графику функции, тем точнее оно обеспечивает требуемое сочетание P , W при заданном C . Также на карту стекол выводятся линии, соответствующие π в заданном диапазоне (линии 2, рисунок 3.1), что позволяет учитывать этот параметр.

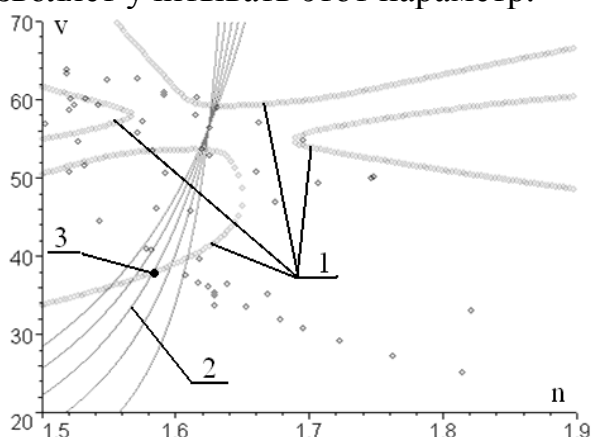


Рисунок 3.1. Схема, иллюстрирующая выбор марок стекол при синтезе двухлинзового склеенного компонента.

В отличие от склеенного, тонкий несклеенный компонент обладает дополнительным свободным параметром, что позволяет при заданных

марках стекол и заданном C обеспечить требуемое сочетание параметров P , W в некотором диапазоне. В работе реализован метод выбора марок стекол двухлинзового несклеенного компонента, позволяющий, наряду с требуемыми P , W , C , обеспечить необходимое значение параметра π и наименьшие по модулю оптические силы отдельных линз (с целью уменьшения aberrаций высших порядков).

При заданных показателе преломления n_2 и дисперсии ν_2 первого стекла и параметре C всего компонента, параметр π однозначно определяется второй маркой стекла, то есть n_4, ν_4 . Подставив в данную зависимость требуемое значение π , имеем некоторую кривую $\nu_4(n_4)$, выражаемую зависимостью:

$$\nu_4 = \frac{\nu_2 n_4 (\pi n_2 - 1)}{n_4 (\nu_2 C + n_2 \pi) - n_2 (C \nu_2 + 1)}. \quad (3.2)$$

Стекла, лежащие на кривой (3.2), в некоторой области обеспечивают все требуемые параметры P , W , π и C . Реализованная программа выводит кривые (3.2) для всех марок на карту стекол и выделяет участки этих кривых, где оптические силы находятся в заданных пределах (рисунок 3.2). Искомые пары стекол расположены на общих кривых, на выделенных участках (1 и 2, рисунок 3.2).

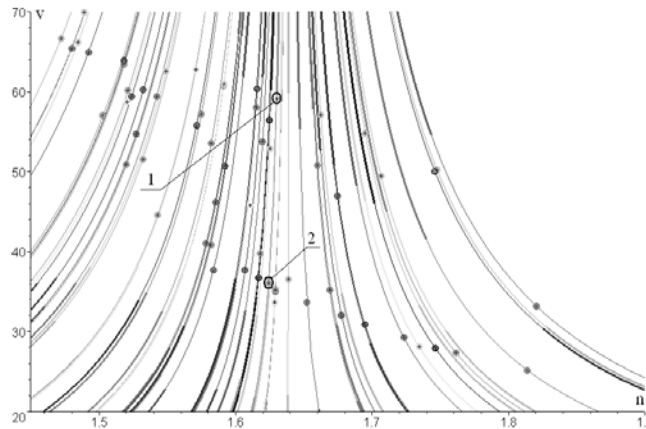


Рисунок 3.2. Схема, иллюстрирующая выбор марок стекол при синтезе двухлинзового несклеенного компонента.

Компонент типа «одиночная линза+склеенный компонент» обладает достаточным числом свободных параметров и позволяет при заданных марках стекол обеспечить требуемое сочетание P , W , π и C . Основной задачей при синтезе такого компонента является уменьшение aberrаций высших порядков. В работе реализован метод синтеза, позволяющий получить компонент, обладающий требуемыми значениями P , W , C , при минимальных aberrациях высших порядков. Критерием малости aberrаций высших порядков была принята минимальность максимальной разности углов преломленного и падающего луча для всех пяти поверхностей. В основе реализованного метода лежат полученные выражения для нулевого луча, проходящего через компонент $\alpha_n \left(n_2, \nu_2, n_4, \nu_4, n_5, \nu_5, \bar{P}, \bar{W}, \bar{C}, \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right)$, где φ_1, φ_2 –

относительные оптические силы одиночной линзы и склеенного компонента. Разработанная программа синтеза осуществляет перебор всех возможных комбинаций стекол для трех линз компонента из заранее заданного набора. При подстановке в выражения для углов параметров стекол и P , W , C , получаем зависимости $\alpha_n\left(\frac{\varphi_1}{\varphi_2}\right)$. Варьируя значение $\frac{\varphi_1}{\varphi_2}$ от -3 до 3 находим такое значение, при котором максимальная разность углов преломленного и падающего луча для всех пяти поверхностей минимальна. Для найденного соотношения $\frac{\varphi_1}{\varphi_2}$ определяем радиусы поверхностей, а также параметр π .

На третьем этапе при помощи оптимизации методом штрафных функций в полученные тонкие компоненты были введены толщины. При этом минимизировались отклонения значений абберрационных характеристик компонентов конечной толщины от тонких компонентов.

Различные варианты решения, полученные для каждого компонента, анализировались с точки зрения соответствия заданным абберрационным свойствам, а также с точки зрения минимальных абберраций высших порядков, оптимизационных возможностей при дальнейшем наращивании полевых и апертурных характеристик системы до требуемых значений, а также с точки зрения простоты конструкции.

Полученные в результате 30^x и 10^x системы с компонентами конечной толщины, оптимизированные в области абберраций первого и третьего порядков для уменьшенных полей и апертур, являются стартовыми схемами для окончательной коррекции в области реальных абберраций, которая описывается в четвертой главе.

В четвертой главе приведены результаты автоматизированной коррекции абберраций 30^x и 10^x объективов с помощью специализированной программы «ZEMAX».

В третьей главе синтез панкратических объективов был осуществлен в области абберраций первых и третьих порядков. Поэтому полученные нами ранее реальные системы были использованы как стартовые схемы для оптимизации с целью получения требуемых относительных отверстий и полей зрения (глава 2), а также исправления абберраций высших порядков.

Для выполнения оптимизации были заданы исходные оптические системы, выбраны переменные параметры и определены оценочные функции.

Основные оптические характеристики полученных в результате оптимизации 30^x и 10^x панкратических объективов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Основные оптические характеристики объективов

Параметр	30^x объектив	10^x объектив
Фокусное расстояние f' , мм	2.2 – 67.66	4.05 – 48.00
Перепад фокусных расстояний, M	30.8^x	11.9^x
Диафрагменное число k	1.6 – 5.15	1.7 – 4.4
Угловое поле зрения 2ω	$64.4^\circ - 2.26^\circ$	$73.0^\circ - 7.1^\circ$
Длина системы L , мм	48.7	70.0

По светосиле и угловому полю рассчитанные объективы не уступают аналогам из патентного обзора. Также по основным характеристикам они удовлетворяют приведенным в главе 1 требованиям к объективам для любительских видеокамер. Полученные системы являются более компактными и обладают большим перепадом фокусных расстояний. Оптические схемы 30^x и 10^x объективов изображены соответственно на рисунках 4.1 и 4.2.

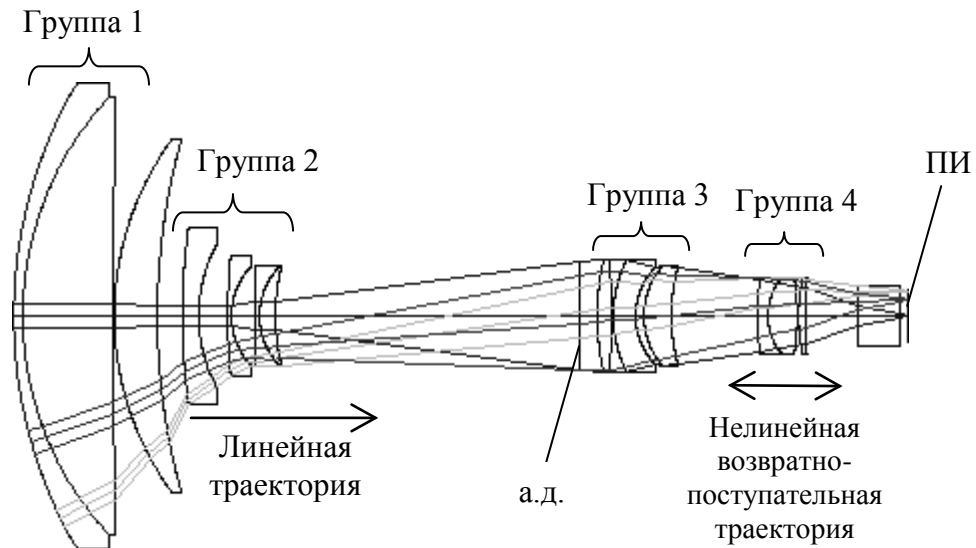


Рисунок 4.1. Оптическая схема 30^x панхроматического объектива

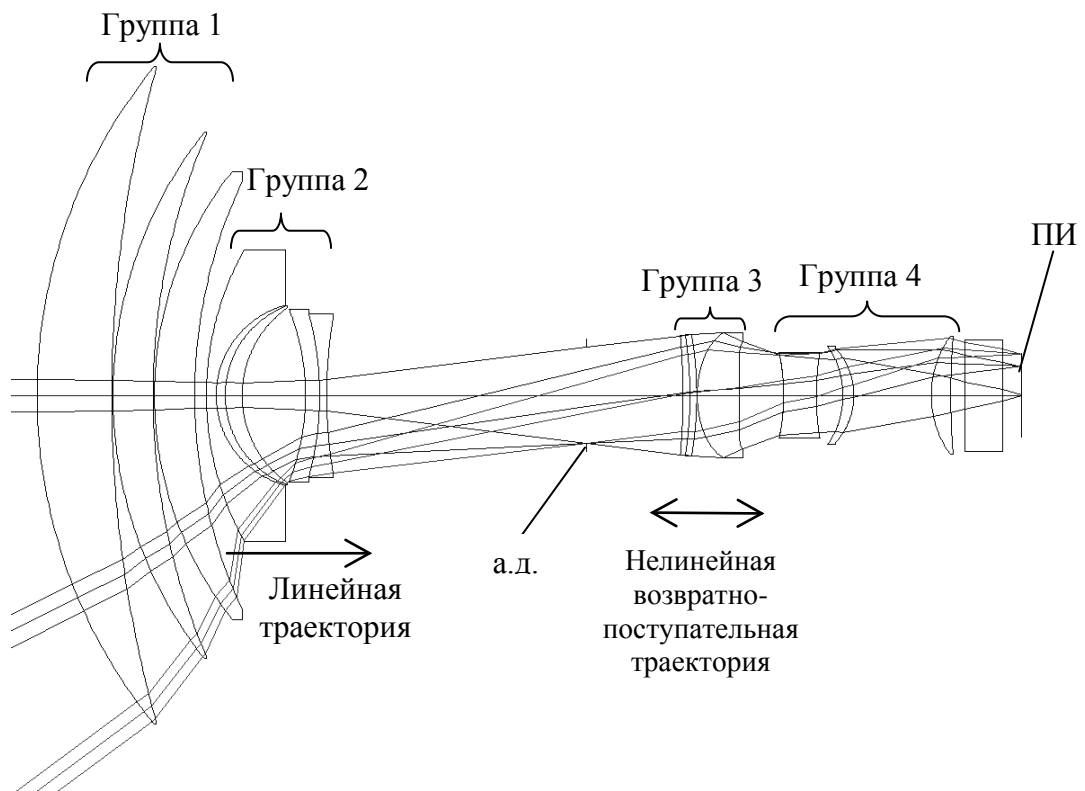


Рисунок 4.2. Оптическая схема 10^x панхроматического объектива

Аберрации панхроматических систем корректируются для нескольких положений подвижных компонентов. 30^x система исправлена для 5 положений, 10^x – для четырех. В большинстве положений для этих систем

выполняются требования по дисторсии и хроматизму, указанные в первой главе. Функция передачи модуляции для 30^x объектива соответствует уровню объективов для любительских видеокамер стандартного качества (SDTV). Качество изображения, формируемого 10^x объективом, выше, поэтому он может быть использован как компактный объектив для видеокамер телевидения высокого качества (HDTV).

Заключение

Основные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработана методика параксиального расчета панкратических систем, обеспечивающих механическую компенсацию смещения плоскости изображения. На основе аппарата матричной оптики и гауссовых скобок предложен метод для определения траекторий перемещения компонентов для основных типов оптических систем (объектив, окуляр, телескопическая система, проекционный объектив) и любого числа подвижных и неподвижных компонентов. Для двух наиболее распространенных схем получены законы перемещения компонентов в зависимости от их оптических сил и поперечных увеличений. Определены условия получения компактных систем, обладающих большим перепадом фокусных расстояний.
2. Проведено исследование различных структурных схем для определения оптимальной оптической схемы компактного панкратического объектива. Для двух наиболее перспективных схем по разработанной методике произведен параксиальный расчет. Получены параксиальные параметры 30^x и 10^x объективов.
3. Разработан и реализован алгоритм расчета основных параметров (Р, W, π , С) параксиальных компонентов посредством оптимизации в многомерном пространстве при условии минимизации аберраций первого и третьего порядков всего объектива для нескольких положений подвижных компонентов.
4. Разработаны и реализованы методы синтеза тонких компонентов с требуемыми аберрационными характеристиками типа: двойной склеенный компонент, двойной несклеенный компонент, одиночная линза и двойной склеенный компонент.
5. В полученные тонкие компоненты были введены толщины с помощью разработанного и реализованного алгоритма оптимизации методом штрафных функций при условии минимизации отклонения значений аберрационных характеристик от требуемых и с учетом аберраций высших порядков.
6. Использование разработанных в работе методов и алгоритмов дало возможность рассчитать исходные схемы двух панкратических объективов. Окончательная оптимизация полученных систем с компонентами конечной толщины была осуществлена с помощью специализированного программного обеспечения. В результате представлены конструктивные параметры двух панкратических

объективов, которые обеспечивают соответственно 30^x и 10^x перепад фокусных расстояний, а также обладают высоким качеством и компактными размерами.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Bezdidko S.N. Some approaches to description of system configuration and structuring optical system database / S.N.Bezdidko, M.V.Popov // Proceedings of SPIE, 2004. - vol. 5524. - P. 426-435.
2. Бездидько С.Н. Некоторые подходы к описанию структуры оптических систем и структуризации базы данных оптических систем / С.Н.Бездидько, М.В.Попов // Сборник трудов общества им. Д.С. Рождественского «Прикладная оптика – 2004». - СПб, 2004. - Т. 3. - С. 44-54.
3. Крутман С.А. Особенности проектирования малогабаритных панкратических объективов для видеокамер / С.А.Крутман, В.Г.Поспехов, М.В.Попов // Сборник трудов 1-й научно-практической конференции «Young opticians meeting YOM-2005». - Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. - С. 60-65.
4. Объектив с переменным фокусным расстоянием. Попов М.В. Патент РФ по заявке № 2005140148, приоритет от 22.12.2005.
5. Попов М.В. Аналитический метод расчета панкратических систем / М.В.Попов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - № 5. - С. 142-153.
6. Попов М.В. Особенности параксиального расчета панкратических объективов для видеокамер. / М.В.Попов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2007. - № 2. – принята к публикации.