

Пискунов Дмитрий Евгеньевич

**МЕТОДИКА СИНТЕЗА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ
ВАРИООБЪЕКТОВ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЧИСЛОМ
ПОДВИЖНЫХ КОМПОНЕНТОВ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2013

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре лазерных и оптико-электронных систем

Научный руководитель:

Хорохоров Алексей Михайлович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Бездидько Сергей Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ОАО «НПК «Системы прецизионного
приборостроения»

Ровенская Тамара Сергеевна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра оптико-электронных приборов
научных исследований
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ведущая организация:

ОАО «НПО «Геофизика-НВ», г. Москва

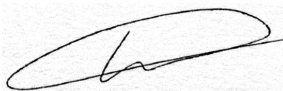
Защита состоится «10» апреля 2013 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направить по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

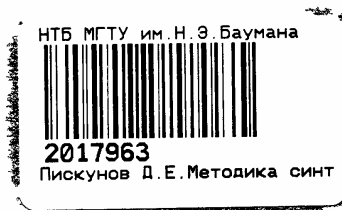
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан “19” февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Бурий Е.В.



2694

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время вариообъективы – оптические системы плавного изменения фокусного расстояния – нашли широкое применение в различных областях науки и техники. В связи с этим представляют интерес разработка и совершенствование методик их расчёта с целью создания высококачественных вариообъективов как соответствующих современному уровню техники, так и перспективных.

Известен ряд научных работ, посвященных вопросам расчёта панкратических систем и, в частности, вариообъективов. Данной проблемой занимались отечественные и зарубежные учёные: Л. Бергштейн, Ф. Бэк, К. Танака, Д.С. Волосов, И.И. Пахомов, М.С. Стефанский, М.Г. Шлякин и др.

В рамках классификации, принятой в отечественной литературе, по оптико-кинематической схеме перемещения компонентов различают панкратические системы как с оптической, так и с механической компенсацией смещения плоскости изображения. В системах с оптической компенсацией компоненты оптической системы перемещаются по линейным законам, при этом плоскость изображения смещается в допустимых пределах. В системах с механической компенсацией неподвижность плоскости изображения обеспечивается нелинейным перемещением одного или более компонентов.

Задачи габаритного и абберационного синтеза вариообъективов в настоящее время полностью не решены. Авторы большинства научных работ рассматривают различные частные случаи панкратических систем: ограничивают число подвижных компонентов, как правило, двумя-тремя, либо анализируют системы с одним из возможных способов компенсации смещения плоскости изображения. Известные численные методы расчёта вариообъективов с произвольным числом подвижных компонентов не гарантируют плавности и непрерывности изменения фокусного расстояния. Таким образом, задачи выбора оптимальной структуры и габаритного синтеза вариообъективов с произвольным числом подвижных компонентов остаются нерешёнными. Это приводит к проблеме выбора исходной оптической схемы для последующей оптимизации. Исходная оптическая схема вариообъектива должна обеспечивать заданный перепад фокусных расстояний и габариты, хорошую абберационную коррекцию при относительном отверстии и полях зрения, близких к заданным. Известные методы абберационного синтеза эффективны при небольших полях зрения и относительных отверстиях, так как основаны на теории аббераций третьего порядка. Принимая во внимание высокие требования к параметрам и характеристикам современных вариообъективов, необходимо разработать методы их абберационного синтеза, учитывающие абберации высших порядков.

Таким образом, задача создания не зависящей от числа подвижных и неподвижных компонентов методики габаритного и абберационного синтеза вариообъективов, формирующих изображения высокого качества, является актуальной.

Цель работы

Целью диссертационной работы является создание методики габаритного и абберационного синтеза высококачественных вариообъективов с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов.

Задачи исследования

1. Разработать метод габаритного синтеза вариообъективов, не зависящий от способа компенсации смещения плоскости изображения и предусматривающий возможность расчёта систем с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов.
2. Разработать метод выбора оптимальной структуры оптической системы вариообъектива.
3. Усовершенствовать и разработать методы абберационного синтеза вариообъективов в области аббераций третьего и пятого порядков соответственно.
4. Разработать методику габаритного и абберационного синтеза вариообъективов различного назначения и доказать её эффективность.

Методы исследования

В диссертации были использованы: теория оптических систем, методы геометрической оптики, аналитические методы решения уравнений, методы исследования функций, численные методы решения систем нелинейных уравнений, методы решения задач оптимизации с ограничениями.

Научная новизна диссертационной работы

1. Разработана методика габаритного и абберационного синтеза вариообъективов с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов в области аббераций третьего и пятого порядков.
2. На основе структурного анализа оптических схем вариообъективов с двумя подвижными компонентами показано, что совокупность всех таких схем может быть преобразована к четырём эквивалентным схемам, являющихся базовыми для последующего габаритного синтеза.
3. Разработан метод выбора оптимальной структуры и габаритного синтеза вариообъективов, состоящих не более чем из пяти групп компонентов, из которых две — подвижны.
4. Предложен метод габаритного синтеза вариообъективов с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов, позволяющий определить законы перемещения компонентов в системе базисных функций и не зависящий от способа компенсации смещения плоскости изображения.
5. Предложен метод расчёта основных абберационных параметров компонентов вариообъектива, обеспечивающих минимум нормы невязки

между заданными и рассчитанными aberrациями для дискретных значений фокусных расстояний вариообъектива.

6. Разработан метод aberrационного синтеза компонентов вариообъектива, состоящих из произвольного числа линз как тонких, так и имеющих конечные толщины.
7. Разработан метод aberrационного синтеза вариообъектива в области aberrаций третьего и пятого порядков, предусматривающий разложение функции aberrаций объектива по полиномам Чебышева и последующую минимизацию коэффициентов разложения.

Практическая ценность работы

1. На основе предложенных методов разработана методика автоматизированного габаритного и aberrационного синтеза вариообъективов, позволяющая создавать высококачественные оптические системы, сократить сроки и трудоёмкость проектирования, снизить затраты на проведение конструкторских работ.
2. С помощью разработанной методики рассчитаны вариообъективы с четырёхкратным и тридцатикратным перепадом фокусных расстояний и широкоугольный проекционный объектив, которые отличаются высокими оптическими характеристиками и могут быть использованы в высококачественной фото- и видеотехнике.
3. Методы габаритного и aberrационного синтеза использованы для расчёта проекционных систем переменного увеличения и «очков дополненной реальности» с функцией воспроизведения трёхмерных изображений.

Внедрение результатов работы

Разработанные методы проектирования использованы в научно-исследовательских работах, выполненных ООО «Исследовательский Центр Самсунг». Внедрение и использование результатов работы подтверждено соответствующим актом.

Апробация результатов и публикации

Материалы диссертационной работы обсуждались на заседании и научных семинарах кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, доложены на IX и X Международных конференциях «Прикладная оптика» (г. Санкт-Петербург, 2010, 2012 гг.).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в пяти статьях в журналах, входящих в Перечень ВАК, и пяти трудах научно-технических конференций. Получены два патента.

Структура и объём диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 174 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок и 28 таблиц.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Разработанная методика габаритного и aberrационного синтеза вариообъективов позволяет рассчитывать высококачественные оптические системы вариообъективов с произвольным числом

подвижных и неподвижных компонентов и не зависит от способа компенсации смещения плоскости изображения.

2. Совокупность всех схем вариообъективов с двумя подвижными группами компонентов может быть преобразована к четырём эквивалентным схемам, являющихся базовыми для выбора оптимальной структуры и габаритного синтеза вариообъектива.
3. Метод, основанный на представлении законов перемещения компонентов в системе непрерывных базисных функций, позволяет рассчитывать вариообъективы с гарантированно плавными перемещениями компонентов.
4. Методы аберрационного синтеза вариообъективов, основанные на представлении аберрационной функции в виде разложения по полиномам Чебышева до пятого порядка включительно позволяют синтезировать оптические системы, формирующие изображения высокого качества.

Достоверность и обоснованность результатов

Теоретические положения и разработанные на их основе методы и алгоритмы основаны на известных и подтверждённых практикой теориях и математических моделях. Достоверность результатов работы подтверждается численными экспериментами, проводимыми с помощью пакета прикладных программ решения задач технических вычислений «Matlab». Результаты синтеза проверялись также с помощью программ анализа и оптимизации оптических систем, получивших мировое признание: «Zemax» и «Code-V».

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цель и основные задачи, приведены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации представлены результаты разработки методов габаритного синтеза вариообъективов.

На этапе габаритного синтеза определяются фокусные расстояния и относительные отверстия компонентов, длина системы, законы перемещения компонентов, а также другие параметры, обеспечивающие необходимый диапазон фокусных расстояний и относительное отверстие вариообъектива при заданных ограничениях на положение компонентов. Габаритный синтез является важным этапом проектирования вариообъектива, поскольку именно от качества габаритного расчёта зависит компактность объектива, сложность его конструкции и трудоёмкость последующего аберрационного синтеза компонентов.

В начале первой главы проведён анализ современного состояния проблемы габаритного синтеза систем переменного увеличения (СПУ), в частности, вариообъективов. Среди многочисленных публикаций, посвящённых данной проблеме, наибольший интерес представляют работы Пахомова И.И., в которых предложена методика расчёта СПУ с линейной

связью между перемещениями компонентов и на её основе методика расчёта панкратических систем с механической компенсацией, развита теория обобщённых параметров панкратических систем, позволяющая при заданном перепаде увеличения определить гауссовы параметры систем, заведомо обеспечивающие этот перепад. При этом всё многообразие таких систем может быть исследовано путём изменения лишь одного обобщённого параметра.

Предлагаемая методика габаритного синтеза вариообъективов пригодна для расчёта систем с любым числом подвижных и неподвижных компонентов. В основу методики положено два разработанных метода синтеза вариообъективов.

Первый метод основан на теории обобщённых параметров панкратических систем Пахомова И.И. Метод предусматривает последовательное выполнение трёх этапов: приведение исходной системы вариообъектива к эквивалентной одно-, двух- или трёхкомпонентной панкратической системе, определение гауссовых параметров эквивалентной системы, обратный переход от эквивалентной системы к исходной. Множество полученных таким образом систем анализируется затем с помощью целевой функции, которая по специально разработанному критерию оценивает их качество. Метод позволяет с помощью обобщённых параметров проанализировать всё многообразие систем с двумя подвижными компонентами.

Второй метод предусматривает расчёт системы с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов. Законы перемещения компонентов при этом определяются в виде разложения по базисным функциям, а расчёт объектива сводится к задаче определения коэффициентов разложения. Метод требует наличия исходной системы, в качестве которой может быть использована система, рассчитанная с помощью первого метода.

Остановимся более подробно на содержании методов.

Из опыта проектирования вариообъективов известно, что широкий спектр технических задач, где требуется их применение, может быть решён с помощью систем с двумя подвижными компонентами. Для систем данного типа, в отличие от систем с произвольным числом компонентов, получены аналитические решения. Всё многообразие вариообъективов с двумя подвижными компонентами может быть преобразовано к системам, где общее число компонентов не более пяти. По возможному расположению подвижных и неподвижных компонентов всего можно выделить девятнадцать типов пятикомпонентных исходных систем с двумя подвижными компонентами: 312, 313, 323, 412, 413, 414, 423, 424, 434, 512, 513, 514, 515, 523, 524, 525, 534, 535, 545, где первая цифра трёхзначного цифрового обозначения определяет число компонентов, а две другие — номера подвижных компонентов. Как правило, исходя из поставленной задачи, разработчик определяет структурную схему вариообъектива на основании опыта, что может привести к неоптимальному выбору. При автоматизированном расчёте, учитывая вычислительные мощности современных ЭВМ, можно оценить с помощью целевой функции все девятнадцать типов исходных схем, осуществив тем самым обоснованный выбор структурной схемы вариообъектива. Этот подход нельзя признать

рациональным, поскольку он предполагает разработку методик расчёта для каждой из девятнадцати типов исходных систем. В работе показано, что все указанные выше типы систем можно преобразовать к четырём эквивалентным. В диссертации сформулированы правила перехода от исходных систем к эквивалентным.

Следуя данным правилам, системы типов 323, 423, 434, 523, 534, 545 (группа I) преобразуют к эквивалентной системе, представленной на рис. 1а, 313, 413, 414, 513, 514, 515 (группа II) — на рис. 1б, 312, 412, 512 (группа III) — на рис. 1в, 424, 524, 525, 535 (группа IV) — на рис. 1г. В дальнейшем эквивалентные системы, представленные на рис. 1а, 1б, 1в, 1г, будем называть системами группы I, II, III и IV соответственно, а переход от исходных систем к эквивалентным — прямым, от эквивалентных к исходным — обратным. В диссертации получены формулы прямого и обратного перехода.

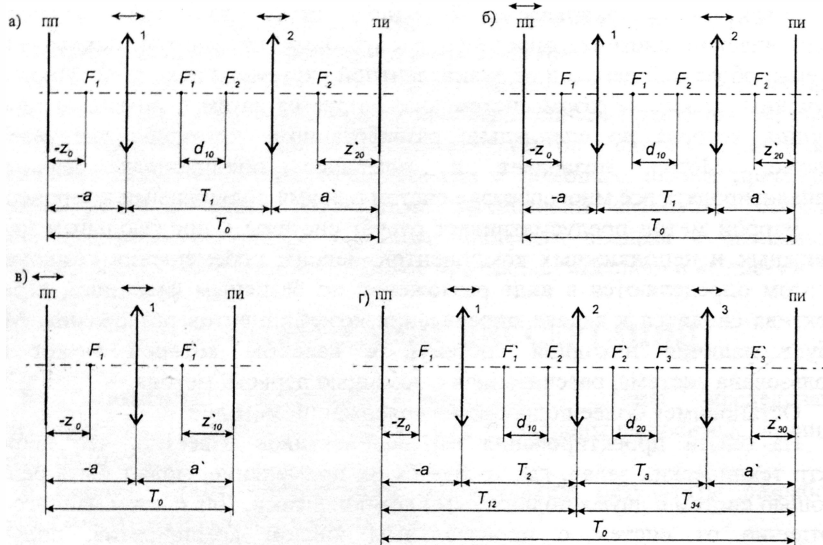


Рис. 1. Эквивалентные системы

Эквивалентная система I (рис. 1а) является двухкомпонентной системой с двумя подвижными компонентами и неподвижной предметной плоскостью. Её параметры вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} z'_{20} &= Z'_{20} b_1 i_1; & f_2^2 &= F_2^2 (b_1^2 - b_1) i_1^2; \\ z_0 &= -Z_0 i_1; & d_{10} &= D_{10} (b_1 - 1) i_1; \\ f_1^2 &= F_1^2 (1 - b_1) i_1^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где i_1, b_1 характеризуют передаточные отношения между перемещениями компонентов и предметной плоскостью, $Z_0, Z'_{20}, D_{10}, F_1, F_2$ — обобщённые параметры, выражаемые через перепад фокусных расстояний или увеличений и некоторый параметр y . Варьируя параметр y , можно проанализировать весь

набор систем, обеспечивающий заданный перепад фокусных расстояний. В диссертационной работе показано, что параметры i_1, b_1 выражаются через увеличение β_0 и длину T_0 эквивалентной системы I в среднем положении:

$$b_1 = -\frac{Z_0^2 F_2^2}{Z_{20}^2 F_1^2} \beta_0^2, \quad (2)$$

$$i_1 = \frac{T_0}{\pm 2\sqrt{F_2^2(b_1^2 - b_1)} \pm 2\sqrt{F_1^2(1 - b_1)_1} + Z_0 + Z_{20}b_1 + D_{10}(b_1 - 1)}. \quad (3)$$

Определены законы перемещения компонентов для случая механической компенсации смещения плоскости изображения:

$$T_1 = \frac{T_0}{2} (1 \pm \sqrt{1 - 4A}), \quad (4)$$

$$a' = \frac{1 - \beta - T_1 \bar{\varphi}_1}{\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2 - T_1 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2}, \quad (5)$$

$$a = \frac{1 / \beta + T_1 \bar{\varphi}_2 - 1}{\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2 - T_1 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2}. \quad (6)$$

где $\bar{\varphi}_i$ — оптическая сила i -го компонента эквивалентной системы, T_1 — расстояние между компонентами, a и a' — расстояния от первого компонента до предметной плоскости и от последнего компонента до плоскости изображений (см. рис. 1а), β — увеличение системы. Переменная A вычисляется следующим образом:

$$A = \frac{\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2}{T_0 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2} + \frac{(\beta - 1)^2}{T_0^2 \beta \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2}, \quad (7)$$

Аналогичные выражения, а также формулы для перехода от исходных систем к эквивалентным и обратно, получены для систем всех групп.

Расчёт исходных трёх-, четырёх- и пятикомпонентных систем производят в следующей последовательности. Вначале осуществляют переход к эквивалентной системе, определяют фокусные расстояния и законы перемещения её компонентов по формулам (1)-(7). Далее выполняют обратный переход к исходным системам, определяют габариты системы и оптимальное положение апертурной диафрагмы. Согласно предложенной методике апертурная диафрагма устанавливается таким образом, чтобы обеспечивались минимальные относительные отверстия компонентов. Полученную систему оценивают с помощью целевой функции, в которую включены требования минимизации габаритов системы, относительных отверстий, обеспечения необходимых расстояний между компонентами, а также другие требования технического задания.

Рассмотренный метод применим для систем, состоящих не более чем из пяти компонентов, что может оказаться недостаточным для получения приемлемых относительных отверстий для последующего абберационного синтеза. Если использовать группы компонентов, то относительные отверстия самих компонентов могут быть уменьшены, при сохранении светосилы

объектива. По возможному расположению подвижных и неподвижных групп компонентов всего можно выделить семь типов систем с двумя подвижными и произвольным числом неподвижных групп компонентов. В диссертационной работе показано, что расчёт данных систем может быть сведён к расчёту одного из следующих типов систем: 312, 313, 323, 413, 423, 424, 524.

Увеличение числа компонентов в группе с целью уменьшения их относительных отверстий приводит к увеличению длины системы. Для того, чтобы получить большой перепад фокусных расстояний и при этом удовлетворить заданным в техническом задании габаритам системы, а также обеспечить приемлемые относительные отверстия, необходимо использовать системы с числом подвижных компонентов более двух. Таким образом, в общем случае мы приходим к задаче расчёта систем с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов. Данная задача может быть сведена к решению системы нелинейных уравнений:

$$P(d, \varphi) = P_k, \quad (8)$$

где P — вектор параксиальных величин, которые должны быть равны предписанным значениям, d — вектор расстояний между компонентами, φ — вектор оптических сил компонентов, P_k — вектор предписанных значений (или целей в терминах автоматизированного проектирования) параксиальных величин для k -ой позиции, $k=1,2,\dots,K$, где K — число позиций.

Каждое расстояние d вектора d есть функция от фокусного расстояния системы: $d = d(f')$, либо в параметрическом виде $d = d(m)$, $f' = f'(m)$, где m — параметр, определяющий положение компонентов. Представим указанные функции в виде разложения по базисным функциям:

$$d(x) = \sum_{i=0}^N a_i F_i(x), \quad (9)$$

где a_i — коэффициенты разложения, N — число членов разложения, $F_i(x)$ — базисная функция i -го порядка, x — аргумент базисной функции. x может быть равен m или f' в зависимости от того, что более удобно для каждой конкретной задачи.

Подставив разложение (9) в систему (8), получим:

$$P(a, \varphi) = P(x). \quad (10)$$

В результате вместо вектора расстояний d необходимо определить коэффициенты a разложения по базисным функциям. В отличие от других подходов к решению системы (8) предложенный метод гарантированно обеспечивает плавность изменения фокусного расстояния. Увеличение числа позиций K не приводит к увеличению числа неизвестных, кроме того, появляется возможность оптимизировать оптические силы φ .

Отметим, что предлагаемый метод пригоден для расчёта систем с любым способом компенсации смещения плоскости изображения. Например, если выбрать степенные функции в качестве базисных и ограничиться первым порядком в разложении (9), то получим системы с линейной связью между перемещениями компонентов. Если при определении законов перемещения

обеспечить равенство коэффициентов разложения при первом члене, то получим системы с жёстко связанными подвижными компонентами. Очевидно, чтобы перейти к системам с механической компенсацией, число членов разложения (9) должно быть более одного.

На основе описанных методов разработана методика габаритного синтеза вариообъективов. На первом этапе методики необходимо выбрать структурную оптическую схему вариообъектива. Разработчик, сформировав целевую функцию, с помощью первого метода синтеза может провести оценку всех девятнадцати систем с двумя подвижными компонентами. На последующем этапе в случае неудовлетворительных результатов, компоненты могут быть заменены группами. Если и в этом случае не удаётся получить приемлемый результат, осуществляют расчёт систем с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов с помощью второго метода. При этом в качестве исходной системы выбирают наилучшую с предыдущего этапа.

Во второй главе диссертации представлены результаты разработки методов абберационного синтеза вариообъективов. Абберационный синтез вариообъектива выполняется с целью определения конструктивных параметров элементов его оптической системы, при которых обеспечивается необходимое качество изображения.

В начале главы проведён анализ литературных источников, посвящённых данной проблеме. На сегодняшний день вопросы теории абберационного синтеза вариообъективов мало освещены в мировой литературе. Общим недостатком известных методов расчёта является то, что они основаны на теории аббераций третьего порядка, которая эффективна при небольших относительных отверстиях и полях зрения. Задача же расчёта большинства светосильных широкопольных объективов решается путём минимизации оценочной функции, в которой учитываются требования к абберационной коррекции и конструктивные ограничения. Реальные абберации определяются из расчёта хода большого числа лучей. Исходная система для оптимизации, как правило, заимствуется из патентных и литературных источников, либо выбирается из каталога систем, поставляемого совместно с коммерческим программным обеспечением. Недостатки такого подхода очевидны. Во-первых, локальные методы оптимизации, используемые в большинстве программ оптических расчётов, не гарантируют оптимальности решения (методы глобального поиска также используются, но, как правило, только на начальных этапах расчёта ввиду их плохой сходимости применительно к оптическим системам). Во-вторых, поскольку исходная система заимствуется из каких-либо источников, создание новых патентно-чистых систем с помощью данного подхода затруднительно. В-третьих, несмотря на высокий уровень развития вычислительной техники, процесс оптимизации занимает достаточно длительное время, вследствие необходимости расчета большого числа лучей. В диссертационной работе предлагается методика абберационного синтеза вариообъективов свободная от указанных недостатков. Методика состоит из следующих этапов: 1) определение основных параметров и хроматических коэффициентов тонких компонентов; 2) синтез компонентов без учёта их

толщин в области аббераций третьего порядка; 3) переход от бесконечно тонких компонентов к компонентам конечной толщины; 4) аналитико-оптимизационный синтез в области аббераций третьего и пятого порядков.

На первом этапе на основе данных, полученных в результате габаритного синтеза, определяются основные параметры $\bar{P}$ и $\bar{W}$ и хроматические коэффициенты C тонких компонентов. Метод определения параметров основан на теории аббераций третьего порядка. В диссертационной работе показано, что для вычисления $\bar{P}$ и $\bar{W}$ необходимо решить систему уравнений:

$$\sum_i A_{i,j} \bar{P}_i + \sum_i B_{i,j} \bar{W}_i = F_j, \quad j = 1..N, \quad (11)$$

где i — номер компонента, j — номер положения компонентов, N — число положений, $A_{i,j}$, $B_{i,j}$, F_j — коэффициенты. Коэффициенты $A_{i,j}$, $B_{i,j}$, F_j определяются по формулам:

$$\begin{aligned} A_{i,j} &= -\sigma_j^3 V_{1j} h_{i,j}^4 \varphi_i^3 - 3\omega_j \sigma_j^2 V_{2j} h_{i,j}^3 y_{i,j} \varphi_i^3 - 3\omega_j^2 \sigma_j V_{3j} h_{i,j}^2 y_{i,j}^2 \varphi_i^3 - \\ &\quad - \omega_j^3 V_{4j} h_{i,j} y_{i,j}^3 \varphi_i^3; \\ B_{i,j} &= -4\sigma_j^3 V_{1j} \alpha_{i,j} h_{i,j}^3 \varphi_i^2 - 3\omega_j \sigma_j^2 V_{2j} (1 + 4\alpha_{i,j} y_{i,j}) h_{i,j}^2 \varphi_i^2 - 6\omega_j^2 \sigma_j V_{3j} \times \\ &\quad \times (1 + 2\alpha_{i,j} y_{i,j}) y_{i,j} h_{i,j} \varphi_i^2 - \omega_j^3 V_{4j} (3 + 4\alpha_{i,j} y_{i,j}) y_{i,j}^2 \varphi_i^2; \\ D_{i,j} &= -2\sigma_j^3 V_{1j} h_{i,j}^2 \alpha_{i,j}^2 \varphi_i - 3\omega_j \sigma_j^2 V_{2j} (1 + 2y_{i,j} \alpha_{i,j}) \alpha_{i,j} h_{i,j} \varphi_i - \omega_j^2 \sigma_j V_{3j} \times \\ &\quad \times \left[6(1 + \alpha_{i,j} y_{i,j}) \alpha_{i,j} y_{i,j} \varphi_i + J_j^2 \varphi_i \right] - \frac{\varphi_i}{h_{i,j}} \omega_j^3 V_{4j} (y_{i,j} + 3\alpha_{i,j} y_{i,j}^2 + 2\alpha_{i,j}^2 y_{i,j}^3); \\ E_{i,j} &= -\sigma_j^3 V_{1j} (4\alpha_{i,j}^2 - \alpha_{i,j} \alpha_{i+1,j}) h_{i,j}^2 \varphi_i - 3\omega_j \sigma_j^2 V_{2j} \left[2\alpha_{i,j} (1 + 2y_{i,j} \alpha_{i,j}) - \right. \\ &\quad \left. - y_{i,j} \alpha_{i,j}^2 \alpha_{i+1,j} \right] h_{i,j} \varphi_i - 3\omega_j^2 \sigma_j V_{3j} \varphi_i \left[1 + 4\alpha_{i,j} y_{i,j} + 4\alpha_{i,j}^2 y_{i,j}^2 - \right. \\ &\quad \left. - \alpha_{i,j} \alpha_{i+1,j} y_{i,j}^2 \right] - \omega_j^3 V_{4j} \frac{\varphi_i}{h_{i,j}} (3y_{i,j} + 6\alpha_{i,j} y_{i,j}^2 + 4\alpha_{i,j}^2 y_{i,j}^3 - \alpha_{i,j} \alpha_{i+1,j} y_{i,j}^3); \\ F_j &= 2\delta g_j - \sum_i D_{i,j} \pi_i - \sum_i E_{i,j}, \end{aligned} \quad (12)$$

где δg_j — требуемое значение меридиональной составляющей поперечной абберации для j -го положения, ω_j — половина углового поля в пространстве предметов, σ_j — задний апертурный угол, φ_i — оптическая сила i -го компонента, $S_{i,j} - S_{v,j}$ — суммы Зейделя, J_j — инвариант Лагранжа-Гельмгольца, $\alpha_{i,j}$, $h_{i,j}$ — углы и высоты на компонентах первого вспомогательного луча, $y_{i,j}$ — высоты второго вспомогательного луча, $V_{1j}, \dots, V_{4j}$ — весовые коэффициенты характеризующие вклад соответствующей абберации (сферической, комы, кривизны поля и астигматизма, дисторсии) в суммарную.

В зависимости от соотношения числа компонентов и их положений система уравнений (11) может быть как переопределенной, так и недоопределенной, что обуславливает методы её решения. В диссертации перелагается отыскивать псевдорешение, наилучшим образом удовлетворяющее всем уравнениям системы, т.е. норма невязки (евклидова, Чебышева и др.) для которого минимальна.

Аналогичный подход применён для определения хроматических коэффициентов C_i .

Решение системы (11) в совокупности с решением системы уравнений для хроматических коэффициентов позволяет получить все исходные данные (φ_i , $\bar{P}_i$, $\bar{W}_i$, C_i) для синтеза отдельных тонких компонентов вариообъектива.

Далее следует этап синтеза компонентов в области аббераций третьего порядка. Разработаны алгоритмы синтеза склеенного и расклеенного дублета, склеенного дублета с линзой, линзы со склеенным дублетом и триплета. В алгоритмах предусмотрена минимизация оценочной функции компонента, в которую могут быть включены в зависимости от типа компонента требования к параметрам $\bar{P}_i$, $\bar{W}_i$, C_i , радиусам поверхностей, материалам линз и др.

В диссертационной работе предложен метод синтеза компонента, состоящего из произвольного числа линз. Метод предусматривает приведение компонента к тонкому триплету и расчёт его параметров, при этом параметры линз, не входящих в триплет, используются для обеспечения положительных толщин компонентов и минимизации аббераций высших порядков.

Конструктивные элементы оптической системы, состоящей из бесконечно тонких линз, являются лишь первым приближением решения задачи расчёта вариообъектива. Для расчёта значений конструктивных элементов реальной оптической системы необходимо перейти к линзам конечной толщины. Предлагаемый метод перехода предусматривает сохранение оптических сил компонентов системы и сумм Зейделя. Преимуществом такого метода является неизменность оптических характеристик вариообъектива при переходе от тонких к «толстым» компонентам. Кроме того появляется возможность ввода толщины для каждого компонента независимо от других. Переход к компонентам конечной толщины сводится к минимизации оценочной функции, в которую входят оптические силы и суммы Зейделя, а также другие члены, например, учитывающие требование минимизации кривизны поверхности.

Теория и практика абберационных расчетов показывают, что реальные абберации светосильных оптических систем сильно отличаются от аббераций третьего порядка, поэтому для таких систем на этапе синтеза следует учитывать абберации высших порядков. В работе предложен аналитико-оптимизационный метод абберационного синтеза оптических систем, позволяющий проводить расчёт вариообъективов с учётом аббераций пятого порядка. Метод основан на разложении функции поперечной абберации по полиномам Чебышева с последующей минимизацией коэффициентов разложения.

В диссертации показано, что разложение поперечной аберрации $\Delta y'$ по полиномам Чебышева может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta y' = & b_1 T_{1m} + b_2 T_{1M} + b_3 T_{2m} + b_4 T_{2M} + b_5 T_{1m} T_{1M} + b_6 T_{3m} + b_7 T_{3M} + b_8 T_{1m} T_{2M} + \\ & + b_9 T_{2m} T_{1M} + b_{10} T_{4m} + b_{11} T_{4M} + b_{12} T_{1m} T_{3M} + b_{13} T_{2m} T_{2M} + \\ & + b_{14} T_{3m} T_{1M} + b_{15} T_{5M} + b_{16} T_{1m} T_{4M} + b_{17} T_{3m} T_{2M} + b_{18}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $T_{1m}, \dots, T_{5m}$, $T_{1M}, \dots, T_{5M}$ — наименее отклоняющиеся от нуля полиномы Чебышева для меридионального и сагиттального сечений соответственно, $b_1, \dots, b_{18}$ — коэффициенты разложения. Получены выражения, связывающие коэффициенты $b_1, \dots, b_{18}$ с коэффициентами разложения в степенной ряд, которые, в свою очередь, выражаются через параметры двух вспомогательных лучей.

Важными аргументами в пользу целесообразности использования полиномов Чебышева являются следующие их свойства. Во-первых, из всех полиномов степени n полиномы Чебышева в области $[-1, 1]$ имеют наименьшее отклонение от нуля. Во-вторых, область значений полиномов по модулю не превышает $1/2^{n-1}$. Учитывая вышеизложенные свойства, задача расчёта объектива на этапе аналитико-оптимизационного синтеза может быть сведена к минимизации абсолютных значений коэффициентов разложения по полиномам Чебышева. При этом автоматически минимизируются аберрации третьего и пятого порядков для всего зрачка. Кроме того, значения коэффициентов разложения позволяют оценить уровень этих аберраций, то есть контролировать ход процесса при автоматизированном аберрационном синтезе. Для минимизации коэффициентов $b_1, \dots, b_{18}$ требуются значительно меньшие вычислительные мощности, чем для минимизации реальных аберраций, полученных из расчёта хода лучей, поскольку для вычисления коэффициентов разложения достаточно рассчитать ход всего двух вспомогательных лучей.

В третьей главе диссертации представлена методика габаритного и аберрационного синтеза вариообъективов и результаты её применения для синтеза новых оптических систем. С помощью методов габаритного и аберрационного синтеза рассчитаны два вариообъектива с четырёх- и тридцатикратным перепадом фокусных расстояний. Также в третьей главе показана возможность использования разработанных методов для синтеза систем с фиксированным фокусным расстоянием на примере расчёта широкоугольного проекционного объектива со стократным увеличением. Параметры рассчитанных систем представлены в таблице 1, а на рисунке 2 и 3 их схемы с ходом лучей.

Таким образом, с помощью разработанных в диссертации методов и методик проведено проектирование трёх оптических систем, не уступающих по качеству, а по некоторым параметрам и превосходящих мировые аналоги.

Таблица 1

Параметры объективов		
Вариообъективы		
Фокусное расстояние	25,6..104 мм	5,7..172 мм
Размер приёмника излучения	22,3x14,9 мм	2,4x1,8 мм
Диафрагменное число		
при минимальном фокусном расстоянии	2,8	2,8
при максимальном фокусном расстоянии	5,6	5,3
Падение освещённости на краю поля	< 50 %	< 25 %
Длина системы	165 мм	159 мм
Задний фокальный отрезок	> 28 мм	>15 мм
МПФ на частоте	40 л/мм	150 л/мм
для широкопольной позиции	> 70 %	> 30 %
для телепозиции	> 40 %	> 20 %
Дисторсия		
для широкопольной позиции	<±5%	<±5%
для узкопольной	<±2%	<±1%
Число подвижных компонентов	2	4
Проекционный объектив		
Размер экрана	80" - 100"	
Микродисплей	0,95" 1080p DMD	
Диафрагменное число	2	
Относительная освещённость на краю поля	>60%	
Проекционное расстояние	349 мм	
Длина системы	430 мм	
Нетелецентричность	<1°	
Задний отрезок	> 40 мм	
МПФ (0,55 л/мм на 100")	>60%	
Хроматизм увеличения	< 0,5 пикселя	
ТВ дисторсия	<0,5%	

Эффективность разработанных методов и методик подтверждается высокими техническими характеристиками рассчитанных систем, а также уменьшением временных затрат на проектирование. Корректность выполненных расчётов проверена посредством анализа разработанных систем в программах оптических расчётов, получивших мировое признание (Zemax, Code-V).

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе, и выводы по диссертации.

В приложении содержится сводка формул для перехода от исходных систем к эквивалентным и обратно.

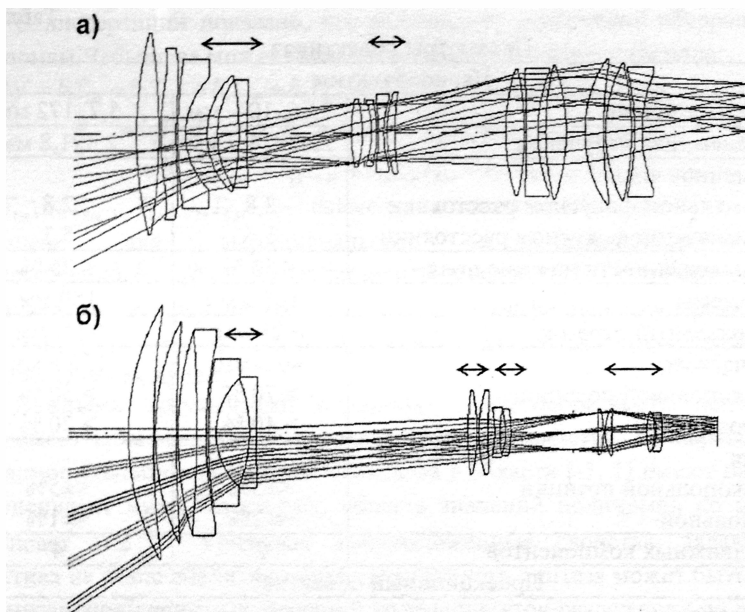


Рис. 2. Схемы вариообъективов:
а) четырёхкратного, б) тридцатикратного

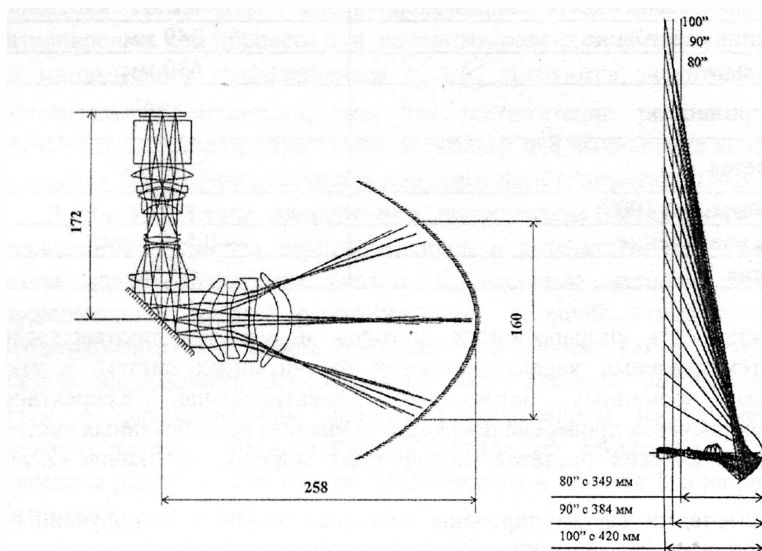


Рис. 3. Схема проекционного объектива

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Впервые разработана методика габаритного и абберационного синтеза высококачественных вариообъективов с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов и произвольной связью между их перемещениями.
2. Разработан оригинальный метод габаритного синтеза вариообъективов, включающих две подвижные группы компонентов. Метод предусматривает приведение всего многообразия исходных систем данного типа к четырём эквивалентным системам, расчёт их параметров и переход к исходным системам, при этом эквивалентные системы исследуют с помощью всего одного обобщённого параметра. Важным преимуществом метода является то, что он позволяет выполнить не только параметрическую оптимизацию системы, но и выбрать её оптимальную структуру.
3. Впервые разработан не зависящий от способа компенсации смещения плоскости изображения метод габаритного расчёта вариообъективов, состоящих из произвольного числа подвижных и неподвижных компонентов. Метод гарантирует получение законов перемещения компонентов в виде непрерывных функций от фокусного расстояния вариообъектива.
4. Предложен метод определения основных абберационных параметров компонентов вариообъектива. Согласно данному методу абберационные параметры компонентов выбирают из условия минимизации нормы невязки между заданными абберациями и рассчитанными для дискретных значений фокусного расстояния вариообъектива.
5. Разработан метод синтеза компонентов, состоящих из произвольного числа линз. Метод предусматривает приведение системы линз к триплету, при этом параметры линз, не входящих в триплет, используют для обеспечения положительных толщин компонентов и минимизации аббераций высших порядков.
6. Впервые разработан метод расчёта вариообъективов в области аббераций третьего и пятого порядков. Метод предусматривает разложение аббераций по полиномам Чебышева с последующей минимизацией коэффициентов разложения. Коэффициенты разложения определяют с помощью расчёта двух вспомогательных лучей, что значительно сокращает время расчётов. Особые свойства разложения по полиномам Чебышева обеспечивают преимущества по сравнению с использованием разложения по другим базисным функциям.
7. На основе предложенных методов и методик разработаны алгоритмы и программы автоматизированного габаритного и абберационного синтеза оптических систем, в частности вариообъективов. С помощью данных программ проведено проектирование оптических систем: вариообъективов с четырёх- и тридцатикратным перепадом фокусных расстояний и широкоугольного проекционного объектива со стократным увеличением. Разработанные объективы по своим характеристикам не уступают мировым аналогам.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Автоматизированный габаритный расчет вариообъективов / И.И. Пахомов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2010. № 3(80). С. 26-41.
2. Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М. Численный метод расчёта систем переменного увеличения с произвольным числом подвижных компонентов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спец. вып. № 8 – Современные проблемы оплотехники. С. 25-35.
3. Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Методика автоматизированного синтеза вариообъективов в области аберраций третьего и пятого порядков // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спец. вып. №8 – Современные проблемы оплотехники. С. 36–52.
4. Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М. Метод расчёта оптических систем, состоящих из произвольного количества компонентов // Естественные и технические науки. 2012. №4. С. 236-240.
5. Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М. Аналитико-оптимизационный метод аберрационного синтеза оптических систем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 7. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/442505.html> (дата обращения 27.01.2013).
6. Автоматизированный аберрационный синтез объективов / И.И. Пахомов [и др.] // Прикладная оптика: Сборник трудов IX международной конференции. СПб., 2010. Т. 2. С. 279-282.
7. Автоматизированный габаритный расчет вариообъективов / И.И. Пахомов [и др.] // Прикладная оптика: Сборник трудов IX международной конференции. СПб., 2010. Т. 2. С. 316-320.
8. Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М. Расчёт систем переменного увеличения с произвольным количеством подвижных групп // Прикладная оптика: Сборник трудов X международной конференции. СПб., 2012. Т. 1. С. 57-61.
9. Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М. Применение методики автоматизированного габаритного и аберрационного синтеза к расчёту четырёхкратного вариообъектива // Прикладная оптика: Сборник трудов X международной конференции. СПб., 2012. Т. 1. С. 62-66.
10. Пискунов Д.Е., Попов М.В., Хорохоров А.М. Аберрационный синтез широкоугольного светосильного проекционного объектива видеопроектора // Прикладная оптика: Сборник трудов X международной конференции. СПб., 2012. Т. 3. С. 35-39.
11. Устройство воспроизведения изображения: Патент № 2413264 РФ заявл. 16.02.2009 / А.В. Феденев, Д.Е. Пискунов // Изобретения. Полезные модели. – 2011. – № 6.
12. Проекционная оптическая система: Патент № 2462741 РФ заявл. 20.12.2010 / И.П. Шишкин, Д.Е. Пискунов // Изобретения. Полезные модели. – 2012. – № 27.