

Государственное учреждение профессионального образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

На правах рукописи

ХАРЧЕНКО Анна Андреевна

УДК 535.31; 681.7.067.23

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТРЕХЗЕРКАЛЬНОГО
ОБЪЕКТИВА БЕЗ ЭКРАНИРОВАНИЯ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических
наук

Санкт-Петербург

2011

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
ГРАММАТИН Александр Пантелеймонович

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
СОКОЛЬСКИЙ Михаил Наумович

кандидат технических наук
ЛИВШИЦ Ирина Леонидовна

Ведущая организация – НПК «ГОИ им.С.И.Вавилова», г. Санкт-Петербург

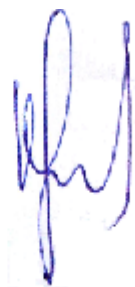
Защита диссертации состоится «14» июня 2011 года в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.227.01 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» при Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: Санкт-Петербург, пер. Гривцова, д. 14, аудитория 314-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ ИТМО.

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

Автореферат разослан «12» мая 2011 года.

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



В.М. КРАСАВЦЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время широко используются технологии дистанционного зондирования Земли. Они позволяют изучать природные ресурсы и решать задачи в интересах сельского хозяйства, метеорологии, картографии и других отраслей науки и техники. В связи с этим серьезное внимание уделяется зеркальным объективам, которые обладают следующими преимуществами по сравнению с линзовыми или зеркально-линзовыми:

- возможность работы в широкой области спектра;
- потенциальная возможность увеличения входного зрачка;
- сокращение габаритов, что обусловлено выбором схемного решения, а также рациональным применением плоских «ломающих» зеркал;
- уменьшение массы за счет снижения количества оптических элементов и использования облегченных конструкций зеркал.

Однако существенным недостатком многих зеркальных систем является экранирование входного зрачка, что приводит к снижению качества изображения. Поэтому особый интерес представляют зеркальные объективы без экранирования.

Таким образом, исследование свойств и возможностей трехзеркального объектива без экранирования является актуальной задачей.

Цель работы

Исследовать свойства и возможности трехзеркального объектива без экранирования.

Задачи исследования

1. Разработка методики расчета трехзеркального объектива без экранирования с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений.
2. Расчет конструктивных параметров системы при заданных значениях фокусного расстояния, диафрагменного числа и рабочего расстояния до изображения.

3. Определение размера рабочего поля системы.
4. Составить таблицы, позволяющие получить информацию о качестве и возможностях объектива, а также о его габаритах.
5. Рассмотреть возможность применения бинарной асферической поверхности в качестве формы поверхности третьего зеркала.
6. Оценить допуски на гиперболоидальное зеркало и влияние воздушного промежутка между зеркалами.

Методы исследования

1. Численные методы определения выходных характеристик исследуемых систем.
2. Компьютерное моделирование оптических систем с применением программ расчета оптики.
3. Методы оптимизации конструктивных параметров оптических систем по критериям качества изображения.
4. Аналитические методы.

Научная новизна

1. Получены формулы для габаритного расчета трехзеркального объектива без экранирования с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений.
2. Выполнены расчеты вариантов системы, позволяющие оценить, как меняется качество изображения в зависимости от изменения значений фокусного расстояния, диафрагменного числа и величины расстояния от последней поверхности до изображения.
3. Предложены варианты объективов с бинарной асферикой, использование которой позволяет увеличить размер углового поля системы.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Методика расчета трехзеркального объектива без экранирования с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений.
2. Результаты расчета систем по разработанной методике.

3. Системы с бинарной асферической поверхностью в качестве формы поверхности третьего зеркала.
4. Оценка допусков на гиперболоидальное зеркало и влияния воздушного промежутка между зеркалами.

Практическая ценность работы

1. Методика расчета трехзеркального объектива без экранирования с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений.
2. Результаты исследования трехзеркального объектива без экранирования представлены в виде таблиц, которые позволяют оценить качество и возможности системы с заданными характеристиками, а также ее габариты. Используя эти таблицы, можно сразу сделать вывод о соответствии объектива требованиям технического задания.
3. Предложено использование асферической поверхности, представляющей собой бинарную асферику, для увеличения углового поля системы.
4. Показано, что при замене асферической поверхности третьего зеркала (сплюснутый сфероид) поверхностью с бинарной асферику происходит увеличение размера углового поля системы на 6-23%.

Апробация работы

Основные результаты работы представлялись на XXXVIII научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО (Санкт-Петербург, 2009), XXXIX научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО (Санкт-Петербург, 2010), VII Межвузовской конференции молодых ученых (Санкт-Петербург, 2010), VIII Межвузовской конференции молодых ученых (Санкт-Петербург, 2011).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 работы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 42 наименований и 4-х приложений; содержит 82 страницы основного текста, 38 рисунков и 36 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Как известно, вся история развития объективов телескопов и аэрокосмических объективов протекала под знаком конкуренции двух типов: линзовых объективов и зеркальных объективов и завершилась убедительной победой последних. Обусловлено это присущими им достоинствами.

Глава 1. Системы трехзеркальных объективов без экранирования.

Все классические осесимметричные зеркальные и зеркально-линзовые системы имеют существенный недостаток – экранирование входного зрачка, что приводит к снижению качества изображения. Например, при экранировании 35% в трехзеркальном объективе, исследование которого является целью данной работы, происходит снижение КПК с 0,4 до 0,31 на частоте 125 мм^{-1} . Таким образом, особый интерес представляют трехзеркальные системы, в которых отсутствует экранирование входного зрачка. Такой эффект может быть достигнут путем децентрирования оптической системы.

К системам такого типа относится «Модифицированный касегреновский телескоп с эксцентричным зрачком». Основной особенностью системы является эксцентричность (децентрированность) входного зрачка и поля изображения по отношению к оптической оси. В пределах плоского поля $1^\circ \times 1^\circ$ можно получить достаточно хорошее качество изображения.

Система «Отражательный трехзеркальный объектив» также не имеет центрального экранирования. Размер прямоугольного поля объектива $10^\circ \times 10^\circ$. Одним из достоинств системы является ее компактность.

«Отражательный оптический триплет с действительным входным зрачком» является внеосевым и децентрированным как по апертуре, так и по полю. Поверхности всех трех зеркал асферические. Размер поля изображения, представляющего собой щель, – от 1° до 20° .

В Государственном оптическом институте им. С.И.Вавилова был изготовлен трехзеркальный объектив без экранирования (прототипом является вышеуказанная система «Отражательный оптический триплет с действительным входным зрачком») с относительным отверстием 1:3,5, угловым полем 2° , с телецентрическим ходом лучей, и задним расстоянием от вершины выпуклого зеркала до изображения, равным $0,12f'$.

Объектив состоит из вогнутого гиперболического зеркала 1, выпуклого сферического зеркала 2 и вогнутого зеркала 3, имеющего форму сплюснутого сфероида (рис.1.).

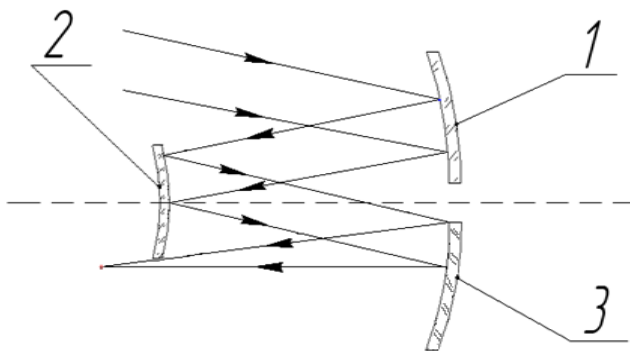


Рис.1. Трехзеркальная оптическая система без экранирования с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений.

Оптическая система является центрированной, имеющей общую оптическую ось. Для устранения экранирования первое и третье зеркала имеют форму сегментов. С целью упрощения изготовления зеркал, а также облегчения сборки и юстировки эти зеркала заключены в общую цилиндрическую оправу, а их вершины совпадают. Апертурной диафрагмой служит оправа сферического зеркала. Она находится в фокусе третьего

зеркала, благодаря чему достигается телецентрический ход лучей в пространстве изображений.

Диссертация посвящена исследованию свойств и возможностей данного объектива.

Глава 2. Расчет трехзеркального объектива без экранирования.

Глава посвящена разработке методики расчета трехзеркального объектива без экранирования. В результате были получены формулы для вычисления конструктивных параметров трехзеркального объектива без экранирования с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений при заданных значениях фокусного расстояния, диафрагменного числа, удаления плоскости изображения от последней поверхности или от вершины выпуклого зеркала (рис.2).

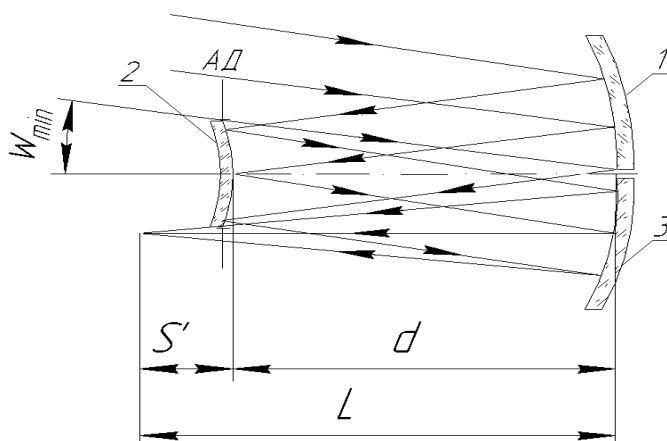


Рис. 2. Схема трехзеркального объектива без экранирования.

1-положительное вогнутое первое зеркало; 2-отрицательное выпуклое второе зеркало; 3-положительное вогнутое третье зеркало;

S' - расстояние от вершины зеркала (2) до плоскости изображения;

d - расстояние между зеркалами (2) и (1), (3);

L = S' + d - расстояние от последнего зеркала (3) до плоскости изображения;

ω_{min} - минимальный угол наклона внеосевого пучка лучей.

Расчёт объектива может быть выполнен двумя способами:

1. Исходными данными являются: f' , K и $x=L/f'$.

Диаметры зеркал и расстояние между ними вычисляются по формулам:

$$D_1 = f/K; \quad D_2 = d/K; \quad D_3 = 2\text{tg}\omega_{\min}L \quad (1)$$

$$d = (2 - \sqrt{3-x})f' \quad (2)$$

Минимальный угол наклона внеосевого пучка лучей:

$$\text{tg}\omega_{\min} = 1/(2K) \quad (3)$$

Радиусы зеркал:

$$r_1 = (2z/(z-1))f'; \quad r_2 = (2z/(z-2))f'; \quad r_3 = -2zf'; \quad \text{где } z = d/f' \quad (4)$$

2. Исходными данными являются: f' , K и $y = S'/f'$

Удаление плоскости изображения от последней поверхности системы:

$$L = (y + 1,5 - \sqrt{1,25 - y})f' \quad (5)$$

Диаметры зеркал, расстояние между зеркалами, радиусы и минимальный угол наклона внеосевого пучка лучей определяются по формулам (1) - (4).

Более удобным является второй способ определения габаритов системы, так как в исходных данных непосредственно указывается S' .

Чтобы избежать виньетирования третьим зеркалом и получить систему с дифракционным качеством изображения был установлен диапазон значений величины $0,25 \leq y \leq 0,4$

Объектив работает внеосевым полем (рис.3). Это позволяет получить исправленное кольцевое поле в зоне, ограниченной двумя окружностями с радиусами Y_{\min} и Y_{\max} , являющимися минимальными и максимальными рабочими полями. В системе в пределах исправленного поля работа ведётся прямоугольным полем с соотношением сторон 3:4 или щелевым полем.

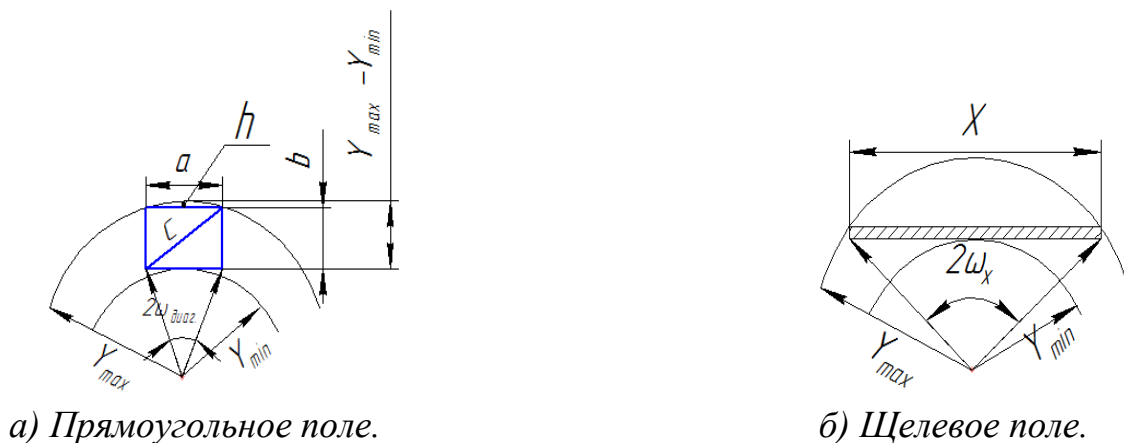


Рис.3. Внеосевое поле.

На основании того, что: $a/b = 4/3$; $Y_{\max} - Y_{\min} = b + h$; $\text{tg}\omega = c/(2f')$ и $h = Y_{\max} - (Y_{\max}^2 - a^2/4)^{1/2}$ (уравнение сегмента), было получено:

$$a = (-12Y_{\min} + 8(13/4 Y_{\max}^2 - Y_{\min}^2)^{1/2}) / 13 \quad (6)$$

Зная a , легко определить b и c .

Размер щелевого поля системы вычисляется по формуле:

$$X = Y_{\max} \sqrt{1 - (Y_{\min} / Y_{\max})^2} \quad (7)$$

Глава 3. Исследование свойств трехзеркального объектива без экранирования.

При выполнении работы был исследован трехзеркальный объектив без экранирования с телецентрическим ходом лучей при различных значениях основных параметров:

- фокусного расстояния f' ;
- диафрагменного числа K ;
- рабочего расстояния до изображения S' .

Для каждого фокусного расстояния (250, 400, 500, 750 и 1000 мм) были взяты три значения диафрагменного числа K (3,5; 4 и 5), для которых в свою очередь были выбраны четыре значения относительного рабочего расстояния системы до изображения S' / f' (0,25; 0,3; 0,35; 0,4). Результатом работы являются таблицы, которые содержат возможные варианты системы. Наличие подобных таблиц позволяет оценить возможности систем, не прибегая к процедурам расчета и оптимизации.

Пример таблиц с конструктивными параметрами и результатами исследования для системы с фокусным расстоянием 250 мм приведен на рис. 4. Критерием оценки качества системы является значение КПК на частоте 125 мм^{-1} : $k \approx 0,4$.

| K | S',(мм) | L,(мм) | d,(мм) | r ₁ ,(мм) | r ₂ ,(мм) | r ₃ ,(мм) | Y _{min} ,(мм) | Y _{max} ,(мм) | Размеры зеркал для систем с прямоугольным полем/целевым полем | | |
|-----|---------|---------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | | | | | | | | | X ₁ x Y ₁ ,(мм) | X ₂ x Y ₂ ,(мм) | X ₃ x Y ₃ ,(мм) |
| 5 | -62,5 | -187,5 | 125,0 | -500,00 | -166,67 | -250,00 | - | - | - | - | - |
| | -75,0 | -206,3 | 131,3 | -553,34 | -178,11 | -262,66 | 25,0 | 36,0 | 97,6 x 25,2 52,0 x 49,2 | 26,6 x 26,6 26,2 x 26,2 | 100,1 x 65,4 52,4 x 41,8 |
| | -87,5 | -225,3 | 137,8 | -614,37 | -190,28 | -275,66 | 25,0 | 35,6 | 96,0 x 49,8 51 x 49,2 | 27,4 x 27,4 27,4 x 27,4 | 98,4 x 44,4 51,2 x 45,6 |
| | -100,0 | -244,5 | 144,5 | -684,96 | -203,26 | -289,02 | 29,2 | 51,8 | 140,0 x 49,2 85,4 x 48,6 | 28,8 x 28,8 28,8 x 28,8 | 146,0 x 47,8 86,8 x 49,8 |
| | -62,5 | -187,5 | 125,0 | -500,00 | -166,67 | -250,00 | - | - | - | - | - |
| 4 | -62,5 | -187,5 | 125,0 | -500,00 | -166,67 | -250,00 | - | - | - | - | - |
| | -75,0 | -206,3 | 131,3 | -553,34 | -178,11 | -262,66 | - | - | - | - | - |
| | -87,5 | -225,3 | 137,8 | -614,37 | -190,28 | -275,66 | 31,2 | 38,9 | 64,0 x 62,2 46,4 x 61,8 | 34,4 x 34,4 34,4 x 34,4 | 63,8 x 56,0 43,6 x 57,0 |
| | -100,0 | -243,9 | 143,9 | -686,65 | -203,69 | -289,10 | 34,0 | 47,1 | 89,2 x 49,6 66,0 x 61,4 | 36,0 x 36,0 36,0 x 36,0 | 90,6 x 48,6 66,4 x 61,8 |
| | -62,5 | -187,5 | 125,0 | -500,00 | -166,67 | -250,00 | - | - | - | - | - |
| 3,5 | -62,5 | -187,5 | 125,0 | -500,00 | -166,67 | -250,00 | - | - | - | - | - |
| | -75,0 | -206,3 | 131,3 | -553,34 | -178,11 | -262,66 | - | - | - | - | - |
| | -87,5 | -225,3 | 137,8 | -614,37 | -190,28 | -275,66 | - | - | - | - | - |
| | -100,0 | -244,27 | 144,27 | -684,25 | -202,89 | -288,84 | 35,7 | 44,1 | 61,8 x 71,2 52,0 x 70,6 | 41,2 x 41,2 41,2 x 41,2 | 62,0 x 69,8 52,0 x 70,6 |
| | -62,5 | -187,5 | 125,0 | -500,00 | -166,67 | -250,00 | - | - | - | - | - |

| K | S',(мм) | L,(мм) | (w _{max} - w _{min}), (град.) | Y _{диаг.} (мм) | a x b, (мм) | 2ω _{диаг.} (град.) | 2ω _с (град.) | K50 / K _{ид} 50 | K125 / K _{ид} 125 | w _{ср} дл.волн | Δz ₁ , (мкм) | Δz ₃ , (мкм) |
|-----|---------|--------|--|----------------------------|----------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 5 | -62,5 | -187,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | -75,0 | -206,3 | 2,44 | 17,2 | 13,8 x 10,3 | 5,56 | 11,8 | 0,69 / 0,83 | 0,40 / 0,58 | 0,12 | 6,7 | 3,0 |
| | -87,5 | -225,3 | 2,38 | 16,6 | 13,3 x 10,0 | 3,80 | 11,6 | 0,72 / 0,83 | 0,40 / 0,58 | 0,10 | 5,7 | 3,0 |
| | -100,0 | -244,5 | 5,03 | 34,5 | 27,6 x 20,7 | 7,90 | 19,5 | 0,75 / 0,83 | 0,40 / 0,58 | 0,11 | 13,3 | 8,7 |
| 4 | -62,5 | -187,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | -75,0 | -206,3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | -87,5 | -225,3 | 1,80 | 12,3 | 9,8 x 7,4 | 2,8 | 10,6 | 0,70 / 0,87 | 0,40 / 0,66 | 0,15 | 10,3 | 5,5 |
| | -100,0 | -243,9 | 3,00 | 20,6 | 16,5 x 12,4 | 4,7 | 15,0 | 0,76 / 0,87 | 0,40 / 0,66 | 0,13 | 14,2 | 9,0 |
| 3,5 | -62,5 | -187,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | -75,0 | -206,3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | -87,5 | -225,3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | -100,0 | -244,3 | 1,86 | 13,4 | 10,7 x 8,1 | 3,1 | 11,8 | 0,76 / 0,88 | 0,40 / 0,71 | 0,17 | 15,1 | 9,5 |

Рис.4. Пример таблиц для системы с фокусным расстоянием 250 мм.

В таблицах приняты следующие обозначения: K - диафрагменное число; S' - расстояние от вершины второго зеркала до плоскости изображения, (мм); L - расстояние от последнего зеркала до плоскости изображения, (мм); d - расстояние между зеркалами (2) и (1), (3) после коррекционного расчета системы, (мм); r₁, r₂, r₃ - радиусы первого, второго и третьего зеркал после коррекционного расчета системы, (мм); Y_{min} и Y_{max} - минимальный и максимальный размеры рабочего поля системы, (мм);

$X_1 \times Y_1, X_2 \times Y_2, X_3 \times Y_3$ – размеры зеркал в сагиттальном и меридиональном сечениях для систем, работающих прямоугольным полем, и систем, работающих щелевым полем, (мм); $(\omega_{max} - \omega_{min})$ – разность между максимальным и минимальным углами наклона внеосевого пучка лучей, (град.); Y_{diag} – размер диагонали ПЗС матрицы, (мм); $a \times b$ – размер ПЗС матрицы, (мм), $2\omega_{diag}$ – размер прямоугольного поля системы, (град.); $2\omega_x$ – размер щелевого поля системы, (град.); K_{50}, K_{125} – КПК объектива на частотах 50 мм^{-1} и 125 мм^{-1} ; $K_{уд 50}, K_{уд 125}$ – КПК системы сравнения – параболического зеркала на тех же частотах; w_{cr} – среднеквадратичное отклонение волновой aberrации, (дл.волн); Δz_1 – максимальное количество снимаемого материала с ближайшей сферы для первого зеркала, (мкм); Δz_3 – максимальное количество снимаемого материала с ближайшей сферы для третьего зеркала, (мкм).

В результате многочисленных расчетов было получено, что при работе в видимой области спектра при фокусном расстоянии 250-1000 мм и диафрагменных числах 3,5-5, при угловых полях $2\omega_{diag} \leq 8^\circ$ или $2\omega_x \leq 19,5^\circ$ объектив рассматриваемого типа удовлетворяет вышеуказанному критерию оценки качества изображения.

Кроме того, установлено, что при диафрагменных числах $K \geq 10$ третье зеркало объектива может быть выполнено сферическим. Так, например, при $f'=1300$ мм, диаметре входного зрачка $D = 100$ мм трехзеркальный объектив с одним гиперболоидальным зеркалом обладает полем изображения дифракционного качества 160×120 мм, что соответствует угловому полю по диагонали кадра $2\omega \approx 9^\circ$.

Общим недостатком всех трехзеркальных объективов без центрального экранирования является превышение размеров первого и третьего зеркал по отношению к диаметру входного зрачка.

Глава 4. Асферические поверхности.

В рассматриваемом трехзеркальном объективе без экранирования первая поверхность является гиперболоидом, а последняя - сплюснутый сфероид, вместо которого, как будет показано, целесообразно использовать бинарную асферическую поверхности с целью увеличения углового поля системы.

Применение асферических поверхностей в системе влечет за собой вопросы об их контроле в рамках существующих технологий.

Интерферометрические методы контроля имеют высокую точность и чувствительность и позволяют дать не только качественное, но и количественное заключение о погрешностях формы асферической поверхности.

Асферические поверхности второго порядка, кроме поверхностей, имеющих форму сплюснутого сфероида ($a_2 > 1$),обладают замечательным свойством: если точечный источник света, формируемый интерферометром, расположен в одном из геометрических фокусов поверхности F_1 , то все лучи, отраженные от асферической поверхности, пересекаются во втором геометрическом фокусе F_2 . Следовательно, геометрические фокусы F_1 и F_2 являются оптически сопряженными анаберрационными точками. Это свойство используется при интерферометрическом контроле данных поверхностей методом анаберрационных точек. Таким методом осуществлялся и контроль вогнутого гиперболоида (рис.5).

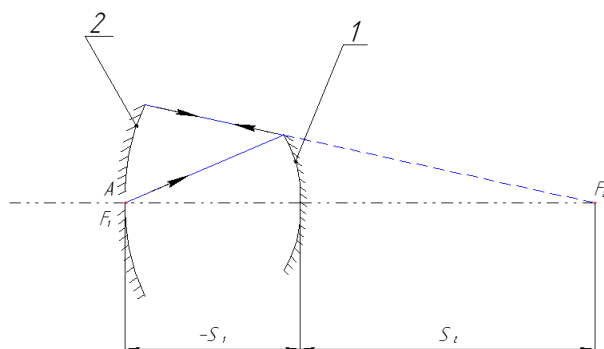


Рис.5. Схема контроля гиперboloида: 1-контролируемая гиперboloидальная поверхность, 2-вспомогательное сферическое зеркало, A - точечный источник света.

Компенсационный метод применим для контроля асферических поверхностей как второго, так и высших порядков, образованных вращением плоской кривой вокруг оптической оси. В том числе этот метод применяется и для контроля сплюснутого сфероида из-за отсутствия у последнего анаберрационных точек. В качестве компенсатора используется синтезированная голограмма (рис.6).

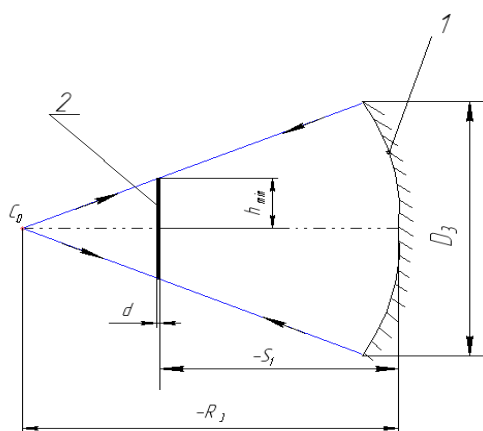


Рис.6.Схема контроля третьего зеркала с использованием синтезированной голограммы: R_3 – радиус третьего зеркала, S_1 –расстояние от контролируемой поверхности до синтезированной голограммы, D_3 –диаметр третьего зеркала, d - толщина синтезированной голограммы, h_{min} - предельная (минимальная) высота синтезированной голограммы, C_0 -центр кривизны контролируемого зеркала.

В ходе работы рассчитаны формы рельефа поверхности синтезированных голограмм для контроля сплюснутого сфероида для каждого объектива и проведено их исследование, которое включало в себя:

- определение количества зон синтезированной голограммы;
- определение пространственной частоты N_{\max} .

Значение пространственной частоты не превышает 60 лин/мм.

Профессор М.М. Русинов в 1987 году обнаружил, что при наличии в центрированной оптической системе хотя бы одной асферической поверхности, образованной вращением эвольвенты окружности вокруг нормали в некоторой ее точке, возникают поперечные aberrации второго порядка. В 1990 г. профессором А.П. Грамматинным было показано, что поверхность, полученная вращением эвольвенты окружности, является частным случаем. Поперечные геометрические aberrации второго порядка свойственны поверхностям, образованным вращением любой плоской кривой вокруг нормали в некоторой ее точке, если эта нормаль не является осью симметрии кривой. Уравнение полученной таким образом поверхности вращения, может быть представлено в виде:

$$z = a_2 \rho^2 + a_3 \rho^3 + a_4 \rho^4 + \dots + a_n \rho^n. \quad (8)$$

При этом OZ -ось вращения (оптическая ось); начало прямоугольных координат z, y, x совпадает с вершиной O поверхности; $\rho = \sqrt{y^2 + x^2}$.

Таким образом, уравнение (8) описывает две поверхности (рис.7), одна из которых (1-1) является результатом вращения участка исходной кривой, соответствующего $\rho > 0$ (участок 0-1), а вторая поверхность (2-2)- $\rho < 0$ (участок 0-2). Поскольку обе поверхности образуются вращением, по сути дела, одной и той же кривой, они были названы бинарной (от лат.*binaries* – двойной) поверхностью.

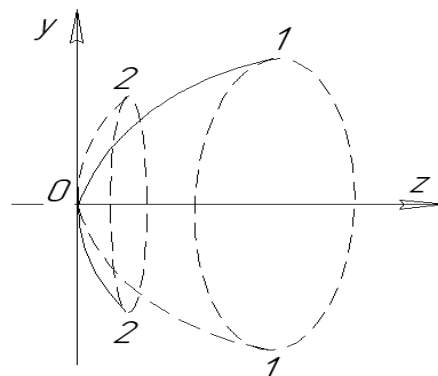


Рис.7. Оптическая поверхность с бинарной асферикой.

Уравнение (8) отличается от обычного уравнения асферической поверхности наличием членов, содержащих нечетные степени величины ρ .

Использование в оптических системах асферических поверхностей, описываемых уравнением (8), может оказаться полезным, если с помощью aberrаций второго порядка может быть достигнута перебалансировка остаточных aberrаций, приводящая к их существенному уменьшению.

Наиболее перспективной в этом отношении является возможность воздействия на кривизну изображения.

Между изменениями меридиональной $\Delta Z'm$ и сагиттальной $\Delta Z's$ составляющих астигматизма третьего порядка существует зависимость

$$\Delta Z'm = 3\Delta Z's. \quad (9)$$

Если теперь коэффициенту a_3 в уравнении (8) придать значение, отличное от нуля, то возникнут aberrации второго порядка, в том числе и астигматизм. При этом изменения меридиональной $\Delta Z'm$ и сагиттальной $\Delta Z's$ составляющих астигматизма второго порядка связаны между собой соотношением

$$\Delta Z'm = 2\Delta Z's. \quad (10)$$

Сравнив выражения (9) и (10), видно, что с помощью асферизации одной из поверхностей оптической системы можно получить в любой точке поля изображения $Z'm = Z's = 0$, т. е. устранить кривизну изображения.

В исследуемой системе aberrацией, ухудшающей качество изображения, а также ограничивающей поле зрения, является кривизна изображения.

Поэтому в рамках проводимого исследования системы трехзеркального объектива без экранирования было предложено использовать поверхность с бинарной асферикой в качестве формы поверхности третьего зеркала.

Важно подчеркнуть, что такой вариант системы с бинарной асферикой оказался удачным. Было показано, что при замене асферической поверхности третьего зеркала (сплюснутый сфероид) поверхностью с

бинарной асферикой происходит увеличение углового щелевого поля на 6 - 23%.

Результаты исследования приведены в таблице 1, где f' - фокусное расстояние системы, K - диафрагменное число, S' - рабочее расстояние до изображения, $2\omega_{x1}$ - угловое щелевое поле системы с асферическими поверхностями второго типа, X_1 – длина щели для систем с асферическими поверхностями второго типа, $2\omega_{x2}$ - угловое щелевое поле систем с бинарной асферической поверхностью третьего зеркала, X_2 – длина щели для систем с бинарной асферической поверхностью третьего зеркала.

Таблица 1.

Результаты расчета углового щелевого поля для систем, содержащих асферическую поверхность второго типа, и систем, содержащих бинарную асферику

| $f', (мм)$ | K | $S', (мм)$ | $2\omega_{x1}(град)$ | $X_1, (мм)$ | $2\omega_{x2}(град)$ | $X_2, (мм)$ |
|------------|-----|------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
| 250 | 5 | 100 | 19,5 | 85,9 | 22,0 | 97,1 |
| 250 | 4 | 100 | 15,0 | 65,8 | 17,0 | 74,7 |
| 500 | 5 | 200 | 13,8 | 120,9 | 16,0 | 140,5 |
| 750 | 5 | 300 | 11,0 | 144,4 | 11,7 | 153,6 |
| 1000 | 5 | 400 | 8,6 | 150,3 | 11,1 | 194,2 |

Следует отметить, что введение бинарной асферики приводит к уменьшению кривизны изображения, но в то же время появляется сферическая aberrация второго порядка в центре поля. В нашем случае система работает краями поля, поэтому сферическая aberrация не повлияет на качество получаемого изображения.

Необходимо было показать, что зеркало, имеющее форму бинарной асферической поверхности, может быть изготовлено в рамках существующих технологий.

В результате было определено, что значение максимального съема материала с ближайшей сферы для поверхностей с бинарной асферикой меняется незначительно по сравнению со значением максимального съема

материала с ближайшей сферы для сплюснутого сфероида. Максимальное отступление от ближайшей сферы не превышает 12 мкм.

Контроль бинарных асферических поверхностей осуществляется компенсационным методом контроля, основанным на использовании синтезированной голограммы в качестве компенсатора.

Так же как и для контроля поверхности, имеющей форму сплюснутого сфероида, были рассчитаны формы рельефа поверхности синтезированных голограмм для контроля бинарных поверхностей.

В результате получено, что максимальное значение пространственной частоты синтезированной голограммы не превышает 43 лин/мм, соответственно, техническая возможность изготовления трехзеркального объектива без экранирования с бинарной асферикой доказана.

Глава 5 посвящена оценке допусков на гиперболоидальное зеркало и влияние воздушного промежутка между зеркалами.

Определены допуски на конструктивные параметры гиперболоидальной поверхности (радиус кривизны при вершине поверхности и коэффициент асферики).

Показано, что влияние погрешности изготовления гиперболоидальной поверхности компенсируется при помощи воздушного промежутка. Изменение воздушного промежутка незначительно (1-3 мм), следовательно, можно говорить о технологичности системы, что является очевидным ее достоинством.

Кроме того, в работе исследовано влияние воздушного промежутка между зеркалами d (мм) и определен диапазон его допустимых отклонений от номинальной величины. Отклонение значений воздушного промежутка находится в диапазоне от 0,03 мм до 0,52 мм

Также исследовано влияния децентрировок зеркал объектива на качество изображения.

Заключение

Диссертационная работа посвящена исследованию свойств и возможностей трехзеркального объектива без экранирования. В заключение отметим основные результаты:

1. Разработана методика расчета трехзеркального объектива без экранирования и получены формулы для вычисления конструктивных параметров системы при заданных значениях фокусного расстояния, диафрагменного числа, удаления плоскости изображения от последней поверхности или от вершины выпуклого зеркала, а также формулы для расчета углового поля изображения объектива;
2. Исследованы свойства и возможности трехзеркального объектива без экранирования. Результаты исследования представлены в виде сводных таблиц. Объектив удовлетворяет критерию оценки качества изображения (значение контраста $k \approx 0,4$ на частоте 125 мм^{-1}) при угловых полях $2\omega_{\text{диаг}} \leq 8^\circ$ или $2\omega_x \leq 19,5^\circ$.
3. При диафрагменных числах $K \geq 10$ третье зеркало объектива может быть выполнено сферическим. Что позволит упростить изготовление и контроль системы, а также уменьшит ее стоимость.
4. Общим недостатком рассматриваемых систем является превышение размеров первого и третьего зеркал по отношению к диаметру входного зрачка.
5. Предложено применение поверхности с бинарной асферикой в качестве формы поверхности третьего зеркала, что привело к результатам, вполне подтверждающим правильность этого предложения. Было показано, что при замене асферической поверхности третьего зеркала (сплюснутый сфероид) поверхностью с бинарной асферикой происходит увеличение размера щелевого поля на 6-23%.

6. Доказано, что зеркало, имеющее форму бинарной асферической поверхности, может быть изготовлено в рамках существующих технологий.
7. Определены допуски на конструктивные параметры гиперболоидальной поверхности первого зеркала (радиус кривизны при вершине поверхности и коэффициент асферики).
8. Исследовано влияние воздушного промежутка между зеркалами d и определен диапазон его допустимых отклонений от номинальной величины.
9. Приведены значения aberrаций, вызванных децентрировкой отдельных поверхностей.
10. Сочетание большого поля изображения, простоты и технологичности конструкции позволяют утверждать, что исследуемый объектив может найти применение в качестве объектива телескопа и аэрокосмического объектива.

По теме диссертации опубликованы следующие работы

1. *Грамматин А.П., Сычева А.А.* Трехзеркальный объектив телескопа без экранирования// Оптический журнал. 2010. Т. 77. №1.С.24-27.
2. *Грамматин А.П., Харченко А.А.* Трехзеркальный объектив без экранирования с бинарной асферикой// Оптический журнал. 2011. Т. 78. №4.С.76-78.
3. *Сычева А.А.* Трехзеркальный объектив без экранирования зрачка со щелевым полем// Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. Выпуск 2. СПб. 2010. С.70-71.
4. *Харченко А.А.* Трехзеркальный объектив без экранирования с бинарной асферикой// Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. Выпуск 2. СПб. 2011. С.34-35.

Тиражирование и брошюровка выполнены в учреждении
«Университетские телекоммуникации»
197101, Санкт-Петербург, Саблинская ул., 14
Тел.(812)233 4669 объем 1 п.л. Тираж 100 экз.