

11-1 (проекторный) и 11-2 (фокусирующий) обеспечивают оптическое сопряжение плоскостей апертурной диафрагмы контролируемой детали и матовой пластинки 13 так, чтобы изображение края детали было резким. Матовая пластинка 13 непрерывно вращается для уничтожения спекл-структуры изображения. Панкратическая система 14 проецирует изображение с матовой пластинки 13 на чувствительную площадку ПЗС-камеры 12, обеспечивая изменение масштаба изображения. Поляризатор 10 предназначен для регулировки уровня освещенности изображения на фотоприемнике.

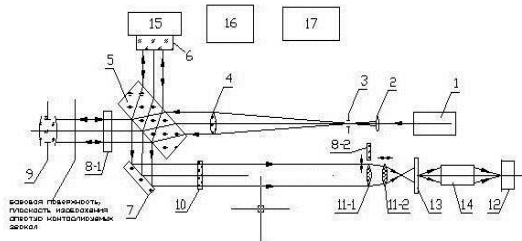


Рисунок 1 – Принципиальная оптическая схема: 1 – лазер; 2 – микрообъектив; 3 – диафрагма; 4 – коллиматорный объектив; 5 – светоделитель; 6, 7 – зеркало; 8 – ослабитель; 9, 11 – объектив; 10 – поляризатор; 12 – ПЗС-камера; 13 – матовая пластинка; 14 – панкратическая система

В дальнейшем в техническом задании на интерферометр указываются требования по конструктивному варианту исполнения интерферометра. Однако, одним из самых важных моментов является задача максимально точно определить

требуемые параметры элементов, входящих в состав прибора, и указать их основные эксплуатационные характеристики.

Так, для лазера изначально определяются следующие параметры: тип, длина волны излучения, длина когерентности, режим работы, мощность, вариант крепления в корпусе и длина сетевого кабеля питания.

Важное значение имеет максимально точный выбор и иных компонентов, входящих в оптическую схему интерферометра. Здесь следует внимательно относиться к линзам, входящим в состав объектива, светоделителям и зеркалам. На каждый из данных элементов следует задать характеристики, которые в общем итоге позволят получить требуемое качество работы интерферометра и уменьшат суммарную погрешность измерения.

В техническом задании отмечается и тот факт, что дизайн интерферометра должен иметь современный вид, а сам прибор соответствовать требованиям по безопасности, эргономике и энергосбережению.

Однако, техническое задание не носит окончательное значение и в процессе дальнейшей работы по разработке интерферометра отдельные узлы и компоненты могут быть изменены.

1. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. – Л., Машиностроение, 1976. – 296 с.;
2. ГОСТ 19.201-78. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению.
3. ГОСТ 34.602.89. Техническое задание на создание автоматизированной системы.

УДК 535.317

## КОРРЕКЦИЯ КРИВИЗНЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТРЕХЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЕМ

Артюхина Н.К., Ключко Т.Р., Чернавчиц Д.А.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Национальный технический университет «Киевский политехнический институт имени И. Сикорского»  
Киев, Украина

Современные зеркальные системы находят широкое применение в различных оптических приборах, работающих как в инфракрасной, так и в ультрафиолетовой областях спектра. В них отсутствуют хроматические aberrации для любых значений оптических характеристик. Двухзеркальные системы наиболее широко исследованы и классифицированы [1]. Системы из трех зеркал обладают более широкими aberrационными возможностями по сравнению с ними. Представляет практический интерес разработка конструкций светосильных зеркальных объективов с увеличенным углом поля зрения, имеющих плоское изображение [2].

В работе проводится исследование возможности получения план-коррекции в трехзеркальном анастигмате. Предполагается также апланатическая коррекция [3]. В процессе анализа использованы оптические схемы базовых систем, представленных

на рисунке 1 (одно из зеркал имеет центральное отверстие для прохождения светового пучка лучей). В объективах лучи претерпевают по одному отражению от каждого из зеркал.

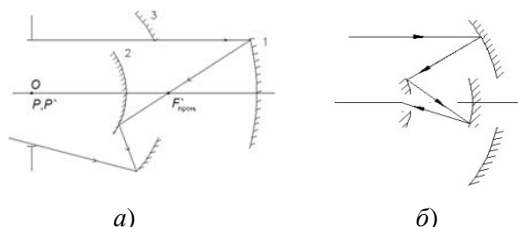


Рисунок 1 – Схемные решения трехзеркальных объективов с промежуточным изображением

Рассмотренные объективы состоят из двух вогнутых зеркал и одного выпуклого и имеют промежуточное изображение. Схема (рис.1, а) состоит из сферических зеркал с концентрическим расположением, где кривизна

изображения принципиально не устранима [4]. В схеме (рис. 1, б) кома, сферическая aberrация и астигматизм откорректированы за счет придания асферической формы всем поверхностям зеркал. Из-за чрезмерно высоких относительных отверстий зеркал (порядка 1:0,3) система технологически не осуществима и не может обладать хорошими оптическими характеристиками: поле зрения  $2\omega$  получается очень малым из-за ограниченных размеров центрального отверстия в выпуклом зеркале [5].

Для расчета и анализа aberrаций из пяти известных методов aberrационного расчета (метод проб, алгебраический, комбинированный, метод автоматической оптимизации и композиционный) в работе применен алгебраический метод.

Установим следующие условия нормировки для первого паракиального луча:

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 < 0, \alpha_4 = 1, h_1 = 1.0, h_2 < 1, f' = 1.0.$$

Далее используем формулы, вытекающие из уравнений aberrационных полиномов [3, с. 71] для заданных условий нормировки. На первом этапе анализа получены значения конструктивных параметров системы (радиусы кривизны, высоты паракиальных лучей и расстояния между поверхностями). Установлено значение свободного коррекционного параметра  $\alpha_2$ , влияющего на конструктивное решение системы. Оно определяет величину оптической силы 1-го зеркала  $\alpha_2 = 1/f'_1$ , поэтому из технологических соображений эффективно задавать эту величину и устанавливать допустимое значение относительного отверстия главного зеркала.

Для выполнения условия Петцваля (получение плоского изображения) предложена методика расчета, которая предполагает исследование зависимости коэффициента кривизны изображения 3 порядка  $D_0$  для различных значений  $\delta$  при выборе соответствующих величин  $\alpha_2$  и  $h_2$ .

Параметр  $\delta$  определяет положение плоскости промежуточного изображения относительно поверхности 1-го зеркала. Рассмотрим четвертую сумму  $D_0$ , определяющую кривизну поля, которой можно управлять, изменяя параметры зеркальной системы (радиусы поверхностей и расстояния между ее элементами). В зеркальных анастигматах, когда коэффициент астигматизма  $C_0 = 0$ , она определяется условной величиной, называемой радиусом кривизны Петцваля  $R_p$ , и равна  $2D_0 = \frac{V_{m+1}}{R_p}$ . В общем случае, если система состоит из  $m$  зеркальных поверхностей, имеем

выражение  $\frac{V_{m+1}}{R_p} = \sum_{s=1}^{s=m} (-1)^{s+1} \frac{\sum \alpha_s}{h_s}$ , где параметр

$V_{m+1}$  описывает среду пространства изображения. Обозначим кривизну изображения 3-го порядка параметром  $\rho_p = \frac{1}{R_p}$ , а чистую кривизну  $s$ -ой зеркальной поверхности

$$\rho_s = \frac{V_s \alpha_{s+1} - V_{s+1} \alpha_s}{h_s}.$$

Очевидно, что  $\rho_p = \sum_{s=1}^m \rho_s$ , к тому же

$$V_{m+1} \rho_p = \sum_{s=1}^m \rho_s = - \sum_{s=1}^m \frac{V_{s+1} \alpha_{s+1} - V_s \alpha_s}{h_s}.$$

Тогда получим выражение  $\sum_{s=1}^{s=m} W_s = \frac{1}{2}(1 - \alpha_1^2)$ ,

которое для заданных условий нормировки

$$\text{преобразуется к виду } \sum_{s=1}^{s=p} W_s = \frac{1}{2}.$$

На втором этапе – этапе коррекции монохроматических aberrаций, использована система трех aberrационных уравнений, преобразованных с учетом полученных выше формул и описывающих исправление сферической aberrации, комы и астигматизма.

В результате проведенной анастигматической коррекции aberrаций 3-го порядка получены деформации  $\sigma_s = -e^2$ . Они определены квадратом эксцентриситета меридиональных кривых второго порядка зеркальных поверхностей.

Разработаны различные варианты план-анастигматов. Конструктивные параметры одного из модулей (рис. 2) и меридиональные уравнения кривых представлены следующими значениями.

$r$	$d$
*-81,22 мм,	- 29,285 мм,
** - 6,94 мм,	134, 285 мм,
*** -67,74 мм,	

При этом меридиональные уравнения зеркал:

$$* y^2 = -162,44x - 0,79048x^2,$$

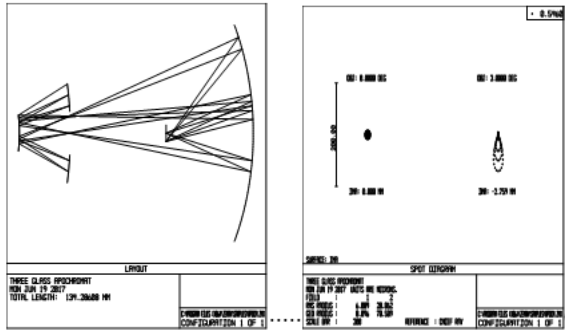
$$** y^2 = -73,88x - 4,48201x^2 + 0,788637x^3 + 0,0768239x^4,$$

$$*** y^2 = -135,48x - 0,70939x^2.$$

Aberrационные характеристики модуля для  $f' = 50$  мм;  $D/f' = 1 : 1,5$ ;  $2\omega = 6^\circ$  приведены в таблице 1.

Таблица 1. Аберрации (расчеты в ППП Orpal)

m	Точка на оси			
	$\Delta S'$ , мм	$\Delta Y'$ , мм	$\eta$ , %	$2\omega$
1,0	-0,024	-0,008	-0,0750	$2^\circ$
Точка вне оси ( $2\omega=6^\circ$ )				
	$'$ , мм	$'$ , мм	$\Delta Y'$ , %	
1,0	0,013	-0,012	0,5	

Рисунок 2 – Двух мерное изображение хода лучей в схеме и диаграмма пятна рассеяния ( $2\omega = 6^\circ$ ).

Высокие значения МТФ и функции концентрации энергии полученной светосильной системы при достаточно больших углах поля зрения обеспечиваются отсутствием хроматизма, что подтверждается компьютерными расчетами ВПП Zemax.

1. Максудов, Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики / Д.Д. Максудов. – М.: Наука, 1984. – 276 с.
2. Артюхина Н.К., Ключко Т. Р. Светосильный зеркальный объектив для дальнего инфракрасного диапазона // Материалы 4-й МНТК «Приборостроение 2011», г. Минск, 16–18.11.2011. – Минск: БНТУ, 2011. – С. 259 – 260.
3. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н.К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2009. – 309 с.
4. Артюхина Н.К.. Патент РБ № 17403 на изобретение «Зеркальный объектив»// Оф. бюл. Изобретения. Патентные модели. Промышленные образцы. – 2013. – № 4. – С. 165.
5. Артюхина Н. К., Тульева Н. Н. Трехзеркальный длиннофокусный объектив-анастигмат // Вести НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2010. – № 4. – С. 93–99.

УДК 528.8; 629.78

## МАЛОГАБАРИТНАЯ БОРТОВАЯ НАУЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Беляев Б.И., Домарацкий А.В., Казак А.А., Кучинский П.В., Станчик В.В.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета  
Минск, Республика Беларусь*

В НИИПФ им. А.Н. Севченко БГУ в рамках выполнения задания НТП СГ «Мониторинг-СГ» создан экспериментальный образец малогабаритной бортовой научной аппаратуры МБНА «Структура», предназначенной для регистрации в автономном режиме с борта микроспутника изображений и параметров излучений ночного и сумеречного свечения атмосферы, а также явлений, связанных с высотными электрическими разрядами и потоками заряженных частиц. Изучение закономерностей, физических механизмов и природы транзиентных и аномальных явлений и процессов в верхних слоях атмосферы на ночной стороне Земли, связанных с чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера, является одним из приоритетных направлений космической деятельности.

МБНА «Структура» позволит решать следующие задачи:

1) Экспериментально отработать метод оптической спектрометрии явлений верхней атмосферы.

2) Исследовать методом оптической спектрометрии явления, связанные с высотными электрическими разрядами и потоками заряженных

частиц: спрайты (высоты 45–100 км); джеты (высоты 20–50 км); вспышки, обусловленные высыпаниями заряженных частиц, транзиентами, эффектами воздействия радиоволн на ионосферу.

3) Исследовать ночные и сумеречные свечения атмосферы: пространственно–временной структуры первого эмиссионного слоя (свечения гидроксидов и кислорода на высотах ~ 100 км); пространственно–временной структуры второго эмиссионного слоя (на высотах ~ 300 км); пространственно–временной изменчивости гидроксильных свечений в диапазоне высот 80–105 км; пространственно–временной структуры и спектрального состава свечений областей полярных сияний; пространственно–временной структуры и спектрального состава излучений серебристых облаков в области мезопаузы на высотах 80–86 км.

В состав МБНА «Структура» входят следующие датчики:

– датчик изображений ДИ, предназначенный для получения панхроматического изображения слабых свечений в области 0,38–1,05 мкм достаточно высокого пространственного разрешения области атмосферы при появлении в поле зрения одного из исследуемых оптических явлений;