

На правах рукописи

ГАЙВОРОНСКИЙ Станислав Викторович

УДК 535.31

**АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
АДАПТИВНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ**

05.11.07 “Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы”

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Санкт–Петербург – 2012

Работа выполнена на кафедре прикладной и компьютерной оптики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий механики и оптики»

Научный руководитель                    доктор технических наук, профессор  
**Зверев Виктор Алексеевич**

Официальные оппоненты:            доктор технических наук, профессор  
**Сокольский Михаил Наумович**  
(ОАО «ЛЮМО»)

кандидат технических наук  
**Гоголев Юрий Анатольевич**  
(НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова»)

Ведущая организация ООО «Научно–производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования», г.Санкт-Петербург

Защита состоится «17» апреля 2012 года в \_\_\_\_\_ ч. \_\_\_\_\_ мин  
на заседании диссертационного совета Д 212.227.01  
при Федеральном государственном бюджетном образовательном  
учреждении высшего профессионального образования «Санкт-  
Петербургском национальном исследовательском университете  
информационных технологий механики и оптики» по адресу: г.Санкт –  
Петербург, пер. Гривцова, д.14, ауд. 314а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ФГБОУ ВПО «СПб НИУ ИТМО»

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» марта 2012

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.227.01  
кандидат технических наук, доцент

В.М. Красавцев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Эффективность применения астрономических инструментов определяется, прежде всего, диаметром входного зрачка и качеством изображения. Естественной причиной, весьма сильно влияющей на качество образованного оптической системой изображения, является земная атмосфера, турбулентность которой образует оптически неоднородное поле, после прохождения которого, нарушается пространственная и временная структура оптического излучения. Единственным средством повышения эффективности применения оптических устройств является создание адаптивных оптических систем. В связи с этим, серьезное внимание уделяется зеркальным объективам, на основе которых, как правило, изготавливают крупногабаритные телескопы. Астрономические телескопы на основе зеркальных систем позволяют работать в широкой области спектра, конструкция их легче и компактней, существует возможность совмещения устройства управления волновым фронтом с одним из элементов системы. Для достижения принципиальной возможности создания адаптивного телескопа при современном уровне технологии изготовления необходимы разработка конструкции зеркальных оптических систем, содержащих отражающие поверхности, и, прежде всего, главного зеркала сферической формы, разработка параметрической (математической) модели для габаритного и абберационного анализа её параметров и их расчёта.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является разработка теоретических основ обоснованного выбора принципиальной схемы оптической системы адаптивного телескопа.

### **Задачи исследования**

1. Анализ принципиальных схем оптических систем телескопов с синтезированной апертурой при модульной структуре их построения.
2. Анализ зеркальных оптических систем телескопов с синтезированной апертурой.
3. Анализ принципов построения и композиция зеркальных оптических систем телескопов с одним из элементов сферической формы.
4. Обоснование выбора материала и параметров элементов составного главного зеркала оптической системы телескопов.
5. Обоснование требований к параметрам и к положению элементов составного главного зеркала оптической системы телескопов.

### **Методы исследования**

1. Аналитические методы, основанные на применении соотношений параксиальной оптики и теории аббераций третьего порядка.
2. Численные методы параметрического синтеза исследуемых оптических систем.
3. Компьютерное моделирование зеркальных оптических систем, основанное на применении современных программ расчёта оптики.
4. Аналитические и численные методы оценки качества изображения.

### **Научная новизна диссертации**

1. Разработан метод параметрического синтеза трёхзеркальной оптической системы без центрального экранирования световых пучков лучей (с внеосевым ходом лучей).
2. Определены условия, при которых одно из трёх зеркал имеет сферическую форму при плананастигматической коррекции аберраций.
3. Определены области решений, при которых осуществимы трёхзеркальные оптические системы без центрального экранирования световых пучков лучей.
4. Предложены варианты композиции и разработан метод расчёта зеркальной оптической системы с главным зеркалом сферической формы при апланатической, анастигматической и плананастигматической коррекции аберраций.
5. Получены аналитические соотношения, определяющие возможность обоснованного выбора требований к элементам составного главного зеркала.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

1. Параметрическая (математическая) модель трёхзеркальной оптической системы, полученная на основе применения понятия тонкого зеркального компонента.
2. Метод параметрического синтеза трёхзеркальных оптических систем без центрального экранирования световых пучков лучей, основанный на применении параметрической модели.
3. Метод параметрического синтеза трёхзеркальных оптических систем с главным зеркалом сферической формы при апланатической коррекции аберраций.
4. Метод параметрического синтеза четырёхзеркальных оптических систем с главным зеркалом сферической формы при апланатической, анастигматической и плананастигматической коррекции аберраций.
5. Аналитические соотношения, позволяющие определить требования к элементам составного главного зеркала.

### **Практическая ценность работы**

1. В работе показано, что при модульном построении оптической системы адаптивного телескопа практически невозможно фазовое сопряжение суммируемых изображений, образованных каждым модулем.
2. Применение параметрической модели трёхзеркальной оптической системы позволяет решать не только задачу параметрического синтеза системы без центрального экранирования, но и задачу компромиссной увязки габаритных параметров системы с характером коррекции аберраций и с требуемой формой отражающих поверхностей.
3. Приведённые в работе варианты композиции зеркальных оптических систем с главным зеркалом сферической формы и разработанный метод их параметрического синтеза позволяют обоснованно выбрать отвечающий требованиям применения вариант схемы оптической

системы адаптивного телескопа наземного или космического базирования.

4. Приведённые в работе аналитические соотношения определяют возможность обоснованного выбора требований к элементам составного главного зеркала.
5. Представленный в диссертационной работе материал может найти отражение в учебных программах по проектированию и расчёту оптических систем.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы представлялись на VII Всероссийской межвузовской конференции молодых учёных в 2010 году, на IX Международной конференции «Прикладная оптика – 2010», на VIII Всероссийской межвузовской конференции молодых учёных в 2011 году, на XI научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО в 2011 году, на XII научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО в 2012 году.

По теме диссертации опубликовано 4 работы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Введение**

По мере увеличения апертуры оптической системы наземного телескопа разрешение образованного изображения начинает ограничиваться неоднородностью (турбулентностью) атмосферы. Принципиально эффективным средством повышения разрешающей способности телескопа является создание адаптивных оптических систем. Компенсация искажений волнового фронта, вызванных атмосферной неоднородностью, может осуществляться в этом случае двумя принципиально различными способами.

Влияние атмосферной неоднородности можно существенно уменьшить, если сплошной входной зрачок телескопа заменить синтезированным из отдельных элементов, в пределах которых должна быть обеспечена возможность независимых от других наклона и поперечного сдвига волнового фронта. В достаточно крупных телескопах апертурной диафрагмой, как правило, служит оправа главного зеркала. Следовательно, именно главное зеркало должно быть синтезировано из отдельных элементов.

Вполне очевидно, что чем сложнее предполагаемая атмосферная неоднородность, тем меньше должен быть размер элемента синтезированной апертуры для её компенсации, а, следовательно, тем больше должно быть датчиков и приводов. В предельном случае, т.е. для полной компенсации деформаций волнового фронта, количество датчиков и приводов должно стремиться к бесконечности.

Для решения задачи непрерывной компенсации деформации волнового фронта в оптической системе адаптивного телескопа необходимо иметь сплошную деформируемую поверхность, к которой возможно применить

механизм адаптации. Очевидно, что начальная форма такой поверхности должна быть либо сферической, либо плоской, так как применение асферической поверхности повлечет за собой усложнение схем управления и обработки. Важно выбрать деформируемую поверхность оптической системы, для чего необходимо исследовать свойства возможных оптических систем крупногабаритных телескопов.

### Глава 1. Анализ принципиальных схем оптики адаптивных телескопов

Задачу увеличения апертуры телескопа можно решить путем применения мультимодульной структуры его конструкции, а также путем применения главного зеркала, состоящего из отдельных сегментов. Первый вариант модульного решения задачи представляет собой систему объективов, оптические оси которых параллельны, а задние фокусы объективов системой из  $2N$  плоских зеркал сводятся в одну точку.

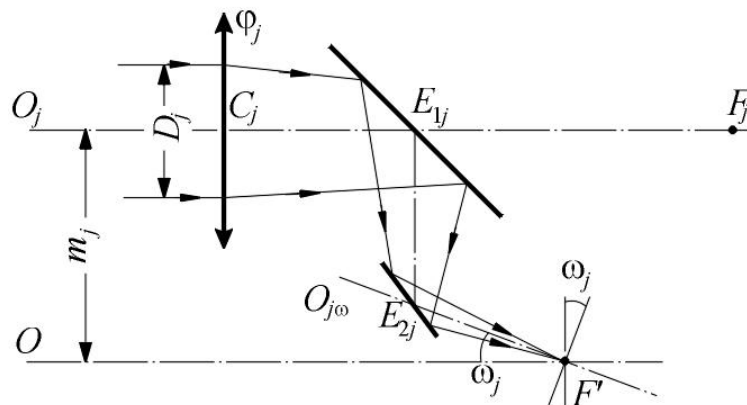


Рис.1 – Мультимодульная схема оптики адаптивного телескопа

Принципиальная схема такого варианта представлена на рис.1. Из габаритных ограничений следует, что  $\sin \omega_j = \frac{m_j}{f_j}$ . При равной площади и круглой форме входных зрачков всех объективов ( $D_j = D_0$ ) следует, что  $\sin \omega_j \geq \frac{D_0}{2f'_0 \sin \pi/N}$ , где  $N$  – количество модулей,  $f'_0$  – фокусное расстояние модулей. Наклон фокальных плоскостей каждого из телескопов приводит к волновому смещению, равному  $W(\omega)_j = W_{00j} + W_{20j}$ , где  $W_{00j} = -f'_j w \omega_j$  – фазовое смещение волнового фронта,  $W_{20j} = -\frac{1}{2} f'_j w \omega_j \sin^2 \sigma'_j$  – расфокусировка изображения в волновой мере.

Наклон фокальных плоскостей модулей относительно плоскости наблюдаемого изображения принципиально можно устранить путём наклона объектива на угол  $\omega_j$ . Однако, компенсировать фазовое смещение  $W_{00j}$ , невозможно.

Если на систему модулей, показанную на рисунке, падает волновой фронт от внеосевой точки предмета  $W_w$ , образующий с волновым фронтом осевой точки  $W_0$  угол  $w$ , фазовое смещение волновых фронтов в  $j$ -м и  $i$ -м

объективах равно  $W_{00ij} = (m_i + m_j) \cdot w$ . Даже при  $m_i + m_j = 1000$  мм, когда  $w = 1''$  величина  $W_{00ij} = 0,005$  мм, что в видимой области превышает  $8\lambda$ , следовательно, в таких системах невозможно получить изображение внеосевого предмета.

Второй вариант модульного построения высокоапертурного телескопа представляет собой сочетание афокальных оптических систем, оптические оси которых параллельны между собой. За афокальными системами располагается центральная фокусирующая система, как показано на рис.2.

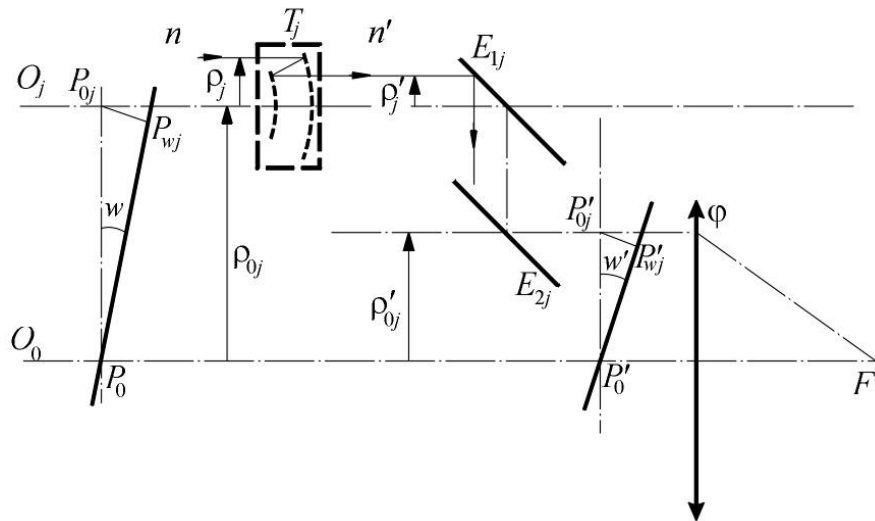


Рис.2 – Вариант построения высокоапертурного телескопа из афокальных модулей

В этом варианте схемы фазовый сдвиг наклонного фронта в каждом из модулей отсутствует, если соблюдается условие:  $\frac{n \cdot \sin w}{n' \cdot \sin w'} = \frac{\rho'_{0j}}{\rho_{0j}} = const.$

Недостатком этой схемы является потребность в дополнительной фокусирующей системе.

В основе третьего варианта построения оптической системы телескопа лежит классическая схема трехзеркального или четырехзеркального телескопа.

## Глава 2. Анализ принципов построения и методов расчета оптических систем адаптивных телескопов

Оптическую систему адаптивного телескопа можно построить, положив в основу оптическую систему объектива Грегори. Если изображение, образованное объективом Грегори, расположить в плоскости, проходящей через вершину отражающей поверхности главного зеркала, то само это зеркало изобразится вторичным зеркалом в плоскости промежуточного изображения, образованного отражающей поверхностью главного зеркала. Если при этом отражающую поверхность главного зеркала принять в качестве входного зрачка объектива, то его изображение в плоскости промежуточного изображения будет выходным зрачком рассматриваемой оптической системы. В этом случае в выходной зрачок

системы можно поместить какой-либо коррекционный элемент, как показано на рис.3.

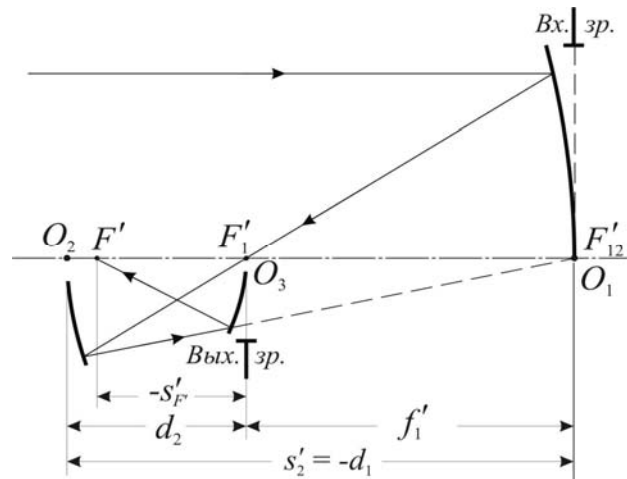


Рис. 3 – Трехзеркальная оптическая система со сферическим главным зеркалом

В работе представлена методика расчета такой системы в виде параметрической модели, позволяющей определить основные габаритные ограничения и вычислить конструктивные параметры системы. Исходным для расчета оптической системы является коэффициент центрального экранирования зрачка по диаметру  $k_{\vartheta}$  ( $k_{\vartheta} > 0$ ), величина которого, как правило, задана или выбирается из условия допустимого влияния на разрешающую способность образованного изображения; значение коэффициента  $k_s$ , определяющего положение плоскости изображения, выбирается из конструктивных соображений. Значения параметров  $\alpha_2, \alpha_3; d_1, d_2; f'_1, S'_{F'}$  определяются полученными соотношениями, которые в соответствии с последовательностью вычислений можно представить в виде:

$$f'_1 = \frac{1}{k_s(1+k_{\vartheta})} \quad \dots(1) \quad \alpha_2 = -\frac{1}{f'_1} \quad \dots(2) \quad d_2 = k_{\vartheta}f'_1 \quad \dots(3)$$

$$d_1 = -d_2 - f'_1 \quad \dots(4) \quad S'_{F'} = -k_s d_2 \quad \dots(5) \quad \alpha_3 = \frac{S'_{F'}}{f'_1} \quad \dots(6)$$

Выражения, определяющие коэффициенты первичных aberrаций изображения, образованного рассматриваемой оптической системой, можно представить в виде:

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=3} h_i P_i + T_1 \sigma_1 - k_{\vartheta} T_2 \sigma_2 - \frac{k_{\vartheta}}{1+k_{\vartheta}} T_3 \sigma_3 \quad \dots(7)$$

$$S_{II} = -\frac{1}{k_s} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \sum_{i=1}^{i=3} W_i \quad \dots(8)$$

$$S_{III} = -\frac{1}{k_s^2 k_{\vartheta}} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \frac{2}{k_s k_{\vartheta}} W_2 + 1 + 2k_s(1+k_{\vartheta}) + \frac{1+k_s}{k_{\vartheta}} \quad \dots(9)$$



Из вида выражений (8) и (9) следует, что первичные кома и астигматизм определяются только деформацией второй поверхности. Следовательно, располагая тремя коррекционными параметрами, можно компенсировать лишь две aberrации из трёх. При  $S_1 = 0$  коэффициенты деформации могут принимать и такие значения, как  $\sigma_1 = 0$  при  $\sigma_3 \neq 0$  или  $\sigma_3 = 0$  при  $\sigma_1 \neq 0$ . Следовательно, при сферическом главном зеркале возможно получить апланатическую коррекцию aberrаций. Недостатком такой системы является большое расстояние между главным зеркалом и последующей двухзеркальной системой. Конструктивные параметры и графики aberrаций рассчитанной по данной методике оптической системы при фокусном расстоянии  $f' = 5000$  мм, относительном отверстии 1:5 и угловом поле изображаемого пространства  $2\omega = 1^\circ$  показаны на рис.4.

№ ПОВ.	РАДИУСЫ	D	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ
			1	
1	-12500	-5000	-1	1000.7
2	-1904.762A	1000	1	299.32
3	3333.333A		-1	484.21

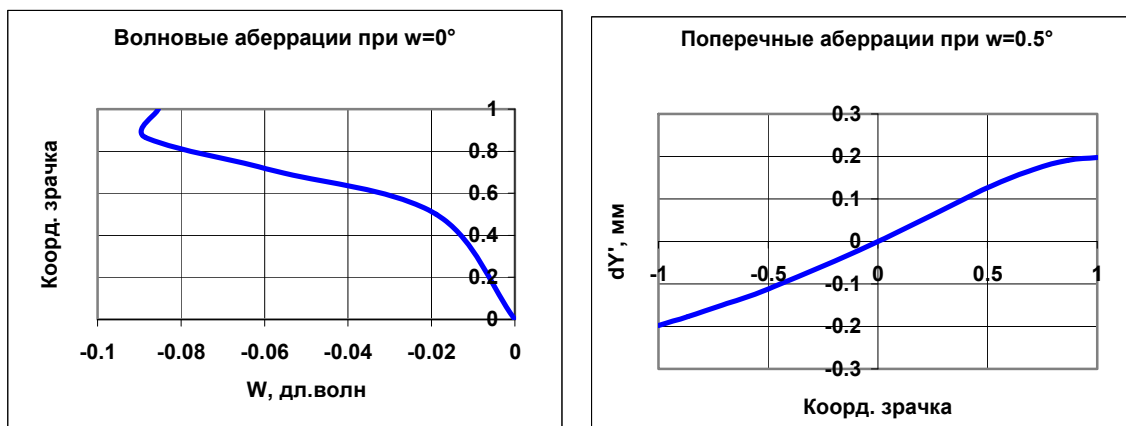


Рис.4 – Абerrации трёхзеркальной оптической системы

Для расширения коррекционных возможностей (для получения плананастигматической коррекции aberrаций), а также для сокращения габаритов системы отражающую поверхность главного зеркала рассматриваемой системы можно заменить системой из двух отражающих поверхностей типа оптической системы Кассегрена. При этом апертурной диафрагмой может служить отражающая поверхность как первого, так и второго зеркала.

Рассмотрим случай, когда апертурной диафрагмой служит отражающая поверхность второго зеркала и на этой же поверхности расположено изображение, образованное третьей отражающей поверхностью, как показано на рис. 5.

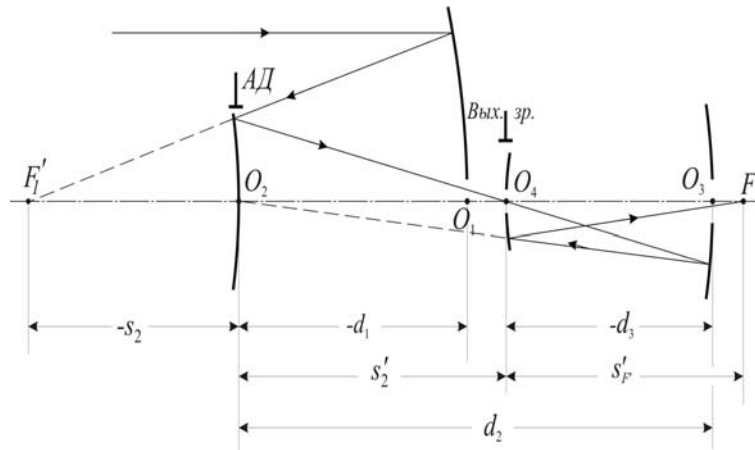


Рис. 5 – Четырехзеркальная оптическая схема объектива с апертурной диафрагмой на вторичном зеркале

В результате параметрического анализа рассматриваемой композиции зеркальной оптической системы получены соотношения, которые можно представить в следующей последовательности параметрического синтеза системы (при  $\alpha_1 = 0$ ;  $h_1 = -1$ ):

$$d_1 = -\frac{k_3}{k_s(k_1 + k_2)} \quad \dots(10) \quad \alpha_2 = \frac{k_3 - 1}{d_1} \quad \dots(11)$$

$$d_2 = -(k_1 + k_2)d_1 \quad \dots(12) \quad \alpha_3 = \frac{k_3}{k_1 d_1} \quad \dots(13) \quad d_3 = k_2 d_1 \quad \dots(14)$$

$$\alpha_4 = \frac{k_2}{k_1 + k_2} \frac{k_3}{k_1 d_1} \quad \dots(15) \quad S'_{F'} = \frac{k_2 k_3}{k_1 + k_2} \quad \dots(16)$$

Первичные aberrации изображения в рассматриваемом случае определяются коэффициентами:

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=4} h_i P_i - T_1 \sigma_1 - k_3 T_2 \sigma_2 + \frac{k_2}{k_1} k_3 T_3 \sigma_3 + \frac{k_2 k_3}{k_1 + k_4} T_4 \sigma_4 \quad \dots(17)$$

$$S_{II} = \frac{1}{k_s(k_1 + k_2)} (P_1 + T_1 \sigma_1) - \frac{1}{k_s} (P_3 + T_3 \sigma_3) - \sum_{i=1}^{i=4} W_i \quad \dots(18)$$

$$S_{III} = -\frac{1}{k_s^2(k_1 + k_2)^2} (P_1 + T_1 \sigma_1) + \frac{k_1}{k_2 k_s^2 k_3} (P_3 + T_3 \sigma_3) + \frac{2}{k_s(k_1 + k_2)} W_1 + \frac{2k_1}{k_2 k_s k_3} W_3 - \frac{(1 - k_3)^2}{k_3^2} k_s(k_1 + k_2) + \frac{k_1 + k_2}{k_2 k_3} (1 + k_s) + \frac{k_s}{k_3} \quad \dots(19)$$

$$S_{IV} = \frac{k_1 + k_2}{k_3} \left[ \frac{(1 - k_3)^2}{k_3} k_s - \frac{1 + k_s}{k_2} - \frac{k_s}{k_1 + k_2} \right] \quad \dots(20)$$

Положив  $S_{II} = 0$  и  $S_{III} = 0$ , получим систему уравнений, решив которую, найдём значения коэффициентов  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Подставив найденные значения этих коэффициентов в формулу (17), при  $S_I = 0$  получим уравнение, содержащее неизвестные коэффициенты  $\sigma_2$  и  $\sigma_4$ . Отсюда следует, что коэффициенты деформации могут принимать и такие значения, как  $\sigma_2 = 0$  при  $\sigma_4 \neq 0$  или  $\sigma_4 = 0$  при  $\sigma_2 \neq 0$ . Таким образом, в рассматриваемой

оптической системе при анастигматической коррекции aberrаций вторичное зеркало может иметь сферическую форму. Подбором коэффициентов в выражении (20) можно получить коэффициент  $S_{IV} = 0$ , т.е. подбором параметров системы можно компенсировать кривизну поверхности изображения. Таким образом, можно получить систему с плананастигматической коррекцией aberrаций.

Конструктивные параметры и графики aberrаций рассчитанной по данной методике оптической системы при  $f=5000$  мм, относительном отверстии 1:5 и угловом поле изображаемого пространства  $2\omega=2^\circ$  приведены на рис. 6.

№ ПОВ.	РАДИУСЫ	D	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ
			1	
1	-1414.627A	-566.93	-1	1000.85
2	-373.145A	992.13	1	206.09
3	-595.072A	-425.2	-1	167
4	3399.543		1	86.17

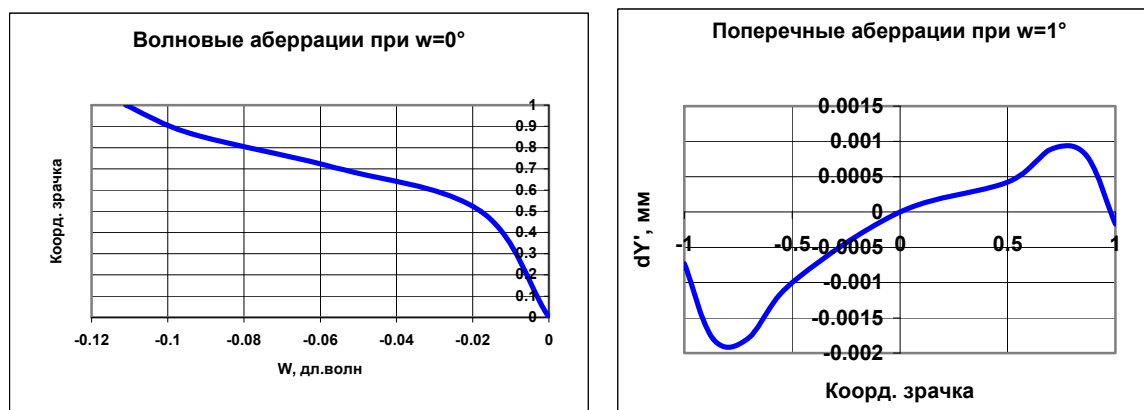


Рис.6 – Aberrации четырёхзеркальной оптической системы с апертурной диафрагмой на вторичном зеркале

В этой системе четвертая отражающая поверхность имеет сферическую форму. Деформируя отражающую поверхность путём прогиба четвертого зеркала, можно компенсировать влияние неоднородностей, вносимых турбулентной атмосферой.

Вариант построения оптической системы в случае, когда апертурной диафрагмой является отражающая поверхность главного зеркала, показан на рис.7.

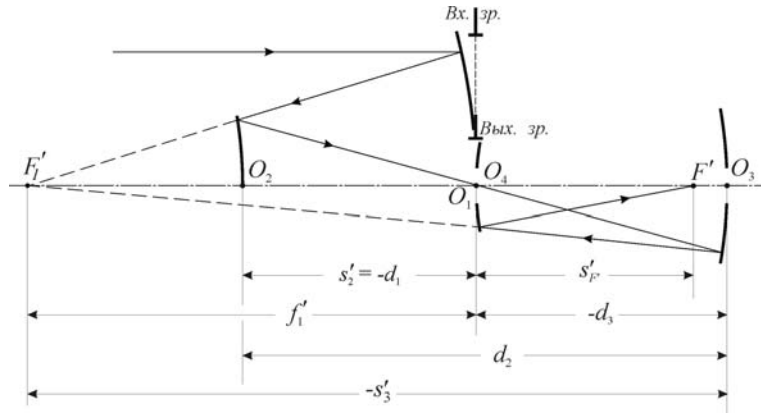


Рис. 7 – Оптическая схема объектива с апертурной диафрагмой на главном зеркале

В этой системе промежуточное изображение, образованное главным и вторичным зеркалами, третьим зеркалом формируется в плоскости изображения главного зеркала. Таким образом, поверхности главного и четвертого зеркал оптически сопряжены.

В результате параметрического анализа рассматриваемой оптической системы получены соотношения, которые можно представить в следующей последовательности параметрического синтеза системы:

$$d_1 = -\frac{1}{k_S} \frac{k_{\mathcal{O}}}{1+k_1(1-k_{\mathcal{O}})} \quad \dots(21) \quad \alpha_2 = \frac{k_{\mathcal{O}} - 1}{d_1} \quad \dots(22)$$

$$d_2 = -(1+k_1)d_1 \quad \dots(23) \quad \alpha_3 = \frac{k_{\mathcal{O}}}{d_1} \quad \dots(24) \quad d_3 = k_1 d_1 \quad \dots(25)$$

$$\alpha_4 = \frac{k_1 k_{\mathcal{O}}}{d_1} \frac{1-k_{\mathcal{O}}}{1+k_1(1-k_{\mathcal{O}})} \quad \dots(26) \quad s'_{F'} = \frac{k_1 k_{\mathcal{O}}}{1+k_1(1-k_{\mathcal{O}})} \quad \dots(27)$$

Первичные aberrации изображения, образованного рассматриваемой системой, определяются коэффициентами

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=4} h_i P_i - T_1 \sigma_1 - k_{\mathcal{O}} T_2 \sigma_2 + k_1 k_{\mathcal{O}} T_3 \sigma_3 + \frac{k_1 k_{\mathcal{O}}}{1+k_1(1-k_{\mathcal{O}})} T_4 \sigma_4 \quad \dots(28)$$

$$S_{II} = -\frac{1}{k_S} \frac{k_{\mathcal{O}}}{1+k_1(1-k_{\mathcal{O}})} (P_2 + T_2 \sigma_2) - \frac{1}{k_S} (P_3 + T_3 \sigma_3) - \sum_{i=1}^{i=4} W_i \quad \dots(29)$$

$$S_{III} = -\frac{1}{k_S^2 [1+k_1(1-k)]^2} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \frac{1}{k_1 k_S^2 k_{\mathcal{O}}} (P_3 + T_3 \sigma_3) - \frac{2}{k_S [1+k_1(1-k)]} W_2 + \frac{2}{k_1 k_S k_{\mathcal{O}}} W_3 + k_S \frac{1-k_{\mathcal{O}}}{k_{\mathcal{O}}} + \frac{1+k_1(1-k_{\mathcal{O}})}{k_{\mathcal{O}}^2} \left[ k_S (2k_{\mathcal{O}} - 1) + \frac{1+k_S}{k_1} k_{\mathcal{O}} \right] \quad \dots(30)$$

Положив в выражениях  $S_{II} = 0$  и  $S_{III} = 0$ , получим систему из двух уравнений, решив которую, найдём значения коэффициентов  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ . Подставив найденные значения коэффициентов в формулу (28), получим уравнение с неизвестными коэффициентами  $\sigma_1$  и  $\sigma_4$ . Отсюда следует, что коэффициенты деформации могут принимать и такие значения, как  $\sigma_1 = 0$  при  $\sigma_4 \neq 0$  или  $\sigma_4 = 0$  при  $\sigma_1 \neq 0$ . Очевидным достоинством

рассматриваемой оптической системы является то, что при апланатической коррекции aberrаций главное (большое) зеркало может иметь сферическую форму, однако при этом исправление aberrаций достигается значительно труднее, что приводит к уменьшению относительного отверстия и угла изображаемого пространства, по сравнению с предыдущей системой. На рисунке 8 приведены конструктивные параметры и aberrационные характеристики системы при  $f'=10500$  мм, относительном отверстии 1:10 и угловом поле изображаемого пространства  $2\omega=7'$ .

№ ПОВ.	РАДИУСЫ	D	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ
			1	
1	-6666.667	-2500	-1	1050.57
2	-3000.000A	3000	1	265.94
3	-1750.000A	-1125	-1	181.59
4	3750.000A		1	113.01

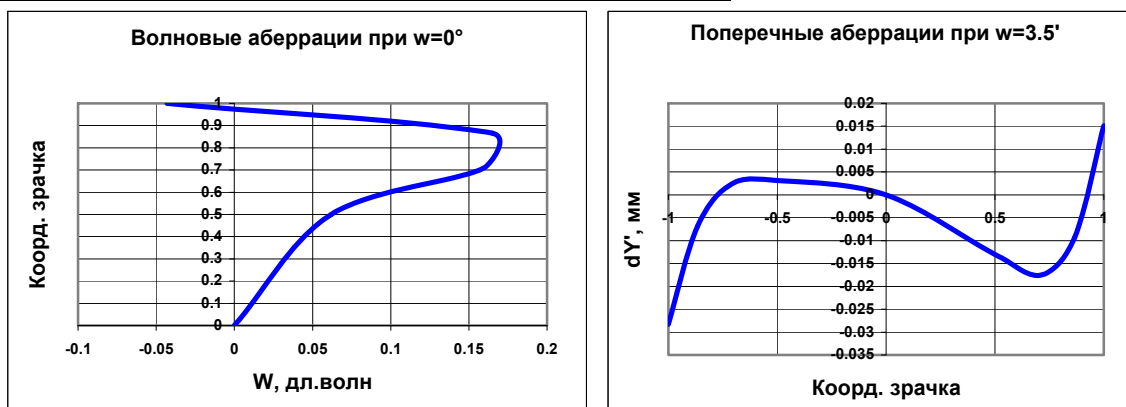


Рис.8 – Aberrации четырёхзеркальной оптической системы с апертурной диафрагмой на главном зеркале

Важно отметить, что в последних двух системах оптическая система, образованная двумя последними зеркалами, вполне может служить в качестве криогенной.

### Глава 3. Анализ и принципы построения трехзеркальных оптических систем без центрального экранирования

В том случае, когда входная апертура имеет умеренные размеры, обосновано применение зеркальных систем, в основе которых лежит оптическая схема Пихта. На основе этой схемы можно построить центрированную или нецентрированную трехзеркальную систему, представленную внеосевыми элементами первой и третьей отражающих поверхностей и осевым элементом второй при внеосевом ходе лучей, а, следовательно, и внеосевом изображении, как показано на рис. 9 (кольцо на круге). Преимущество таких систем состоит в том, что при дифракционном качестве изображения отсутствует центральное экранирование зрачка, что повышает разрешающую способность на средних пространственных частотах.

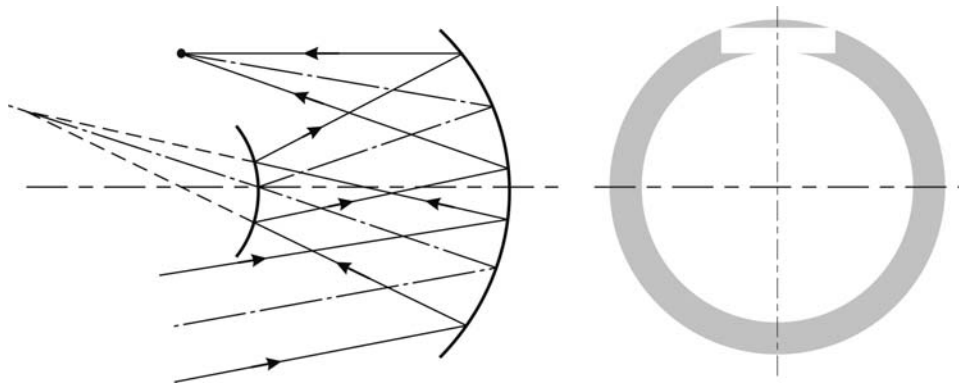


Рис.9 – Плананастигматическая система из трех отражающих поверхностей при внеосевом ходе лучей, формирующая кольцевое поле изображения

В общем случае задачу параметрического синтеза оптической системы из трех отражающих поверхностей можно решить путем построения ее параметрической модели. Для этого, дополнив каждую поверхность сферической или несферической формы безабберационной плоской поверхностью, образуем систему тонких зеркальных компонентов, обладающих оптической силой  $\varphi_i = (-1)^i \cdot 2/r_i$ , где  $r_i$  – радиус кривизны в осевой точке первой по ходу лучей отражающей поверхности компонента, при этом расстояние между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м компонентами  $d_i = (-1)^i \cdot d_{0i}$ , где  $d_{0i}$  – расстояние между  $i$ -й и  $(i+1)$ -й поверхностями в исходной системе. Будем считать, что в системе из трех компонентов  $\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \varphi_3$ . Обозначим  $\varphi_3 = \varphi_k$ ,  $\varphi_2 = \varphi_0$ , а  $d_2 = d$ . Взаимосвязь параметров определим с помощью соответствующих коэффициентов в виде:

$$\varphi_1 = k_k \varphi_k, \quad \varphi_2 = k_0 \varphi_k, \quad d_1 = k_t d, \quad \varphi_k d = d_k, \quad S'_{F'} = k_s d.$$

Коэффициент центрального экранирования по диаметру входного зрачка определяется отношением:

$$k_{\text{э}} = \frac{h_2}{h_1} = h_2 = 1 - \varphi_1 d_1 = 1 - k_t \varphi_1 d \quad \dots(31)$$

Из выражения (31) следует, что коэффициент  $k_{\text{э}} = 0$  при  $f' = d_1$ , а  $k_{\text{э}} = 1$  при  $\varphi_1 = 0$ . Таким образом, при изменении коэффициента центрального экранирования в интервале  $0 \leq k_{\text{э}} \leq 1$  оптическая сила первого компонента изменяется в интервале  $0 \leq f'_1 \leq \infty$ . Отсюда следует, что выбор значения коэффициента  $k_{\text{э}}$  определяет выбор одного из всего множества сочетаний параметров объектива рассматриваемой конструкции.

Аналитические соотношения, определяющие требуемую взаимосвязь коэффициента  $k_{\text{э}}$  с параметрами системы, выражаются следующими соотношениями:

$$\varphi_1 = \frac{1 - k_{\text{э}}}{k_t d} \quad \dots(32)$$

$$\varphi_2 = \frac{k_3 - (k_s + \varphi_1)d}{k_3 d} \quad \dots(33)$$

$$\varphi_3 = \frac{1 - \varphi_1 - k_3 \varphi_2}{k_3 - (\varphi_1 + k_3 \varphi_2)d} \quad \dots(34)$$

Дополним полученную систему уравнений выражением вида:

$$-\varphi_3 = S_{IV} + \varphi_1 + \varphi_2 \quad \dots(35)$$

Решая систему уравнений методом Гаусса исключения неизвестных, получаем уравнение, относительно величины  $d$  в виде (при  $S_{IV} = 0$ ):

$$d^2 + \frac{k_s(1 - k_3)^2 - (1 + 2k_s)k_3 k_t}{k_s^2 k_t} d + \frac{k_3^2}{k_s^2} = 0 \quad \dots(36)$$

Первичная сферическая абберация, кома и астигматизм определяются соответственно коэффициентами  $S_I^*$ ,  $S_{II}^*$ ,  $S_{III}^*$ , причем  $S_I^* = B_0$ ,  $S_{II}^* = K_0 + qB_0$ ,  $S_{III}^* = C_0 + 2qK_0 + q^2 B_0$ , где

$$B_0 = P_1 + T_1 \sigma_1 + k_3(P_2 + T_2 \sigma_2) + k_s d(P_3 + T_3 \sigma_3) \quad \dots(37)$$

$$K_0 = -W_1 - W_2 - W_3 + k_3 S_2(P_2 + T_2 \sigma_2) + k_s d S_3(P_3 + T_3 \sigma_3) \quad \dots(38)$$

$$C_0 = -2S_2 W_2 - 2S_3 W_3 + k_3 S_2^2(P_2 + T_2 \sigma_2) + k_s d S_3^2(P_3 + T_3 \sigma_3) \quad \dots(39)$$

В рассматриваемой конструкции оптической системы оптическая сила первого компонента  $\varphi_1 > 0$ . Следовательно, в соответствии с формулой (32) значение коэффициента экранирования  $k_3$  должно удовлетворять условию:  $k_3 < 1$ . Оптическая сила второго компонента  $\varphi_2 < 0$ . Следовательно, в соответствии с формулой (33) коэффициент экранирования  $k_3$  должен удовлетворять условию  $k_3 < (1 + k_t k_s d) / (1 + k_t)$ . При этом при  $k_t = k_s = 1$  уравнение (36) можно преобразовать в уравнение вида:  $k_3^2 - 3k_3 + 1,5 = 0$ . Отсюда следует, что значениям  $\varphi_1 > 0$  и  $\varphi_2 < 0$  удовлетворяет значение  $k_3 < 0,634$ . Таким образом, в рассматриваемой оптической системе коэффициент центрального экранирования по диаметру зрачка может принимать значения в диапазоне  $0,382 < k_3 < 0,634$ .

Для ряда значений коэффициента  $k_3$  из интервала  $0,4 \leq k_3 \leq 0,6$  при выбранных значениях коэффициентов  $k_s$  и  $k_t$  решаем уравнение (36), откуда находим величину  $d$ . Подставив найденную величину  $d$  в формулы (32), (33) и (34), находим остальные параметры рассматриваемой оптической системы. Подставив значения параметров системы в выражения, определяющие коэффициенты деформации  $B_0, K_0$  и  $C_0$ , получаем систему уравнений относительно коэффициентов деформации  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$  отражающих поверхностей, т.е. относительно коррекционных параметров системы. Полученные уравнения определяют условия взаимной компенсации соответствующих аббераций изображения при  $B_0 = 0, K_0 = 0$  и  $C_0 = 0$ . Решив при этом условия систему уравнений относительно величин  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$ , получаем полный набор параметров оптической системы из трех отражающих поверхностей, формирующей изображение, свободное от первичных сферической

абберации, комы, астигматизма и кривизны поверхности изображения (при  $S_{IV} = 0$ ).

На рис. 10 представлена зависимость коэффициентов деформаций  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  поверхностей от коэффициента экранирования  $k_3$  при  $k_t=k_s=1$ . Из графиков видно, что при некоторых значениях коэффициента экранирования можно получить оптическую систему с одним из компонентов сферической формы. Так, например, при  $k_3=0,57$  главное зеркало будет сферической формы, а при  $k_3=0,404$  – вторичное зеркало.

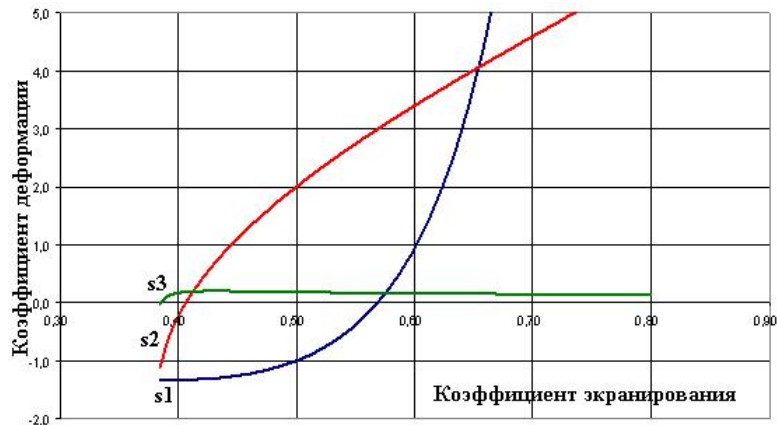


Рис.10 – Зависимость коэффициентов деформаций от коэффициента экранирования

Конструктивные параметры и абберационные характеристики трехзеркальной оптической системы при  $f=1500$  мм, относительном отверстии 1:5 и угловом поле изображаемого пространства  $2\omega=8^\circ$ , имеющей вторичное зеркало сферической формы, приведены на рис.11.

№ ПОВ.	РАДИУСЫ	D	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ
			1	
1	-2952.017A	-876.42	-1	605.11
2	-923.139	876.42	1	121.91
3	-1343.168A		-1	472.04

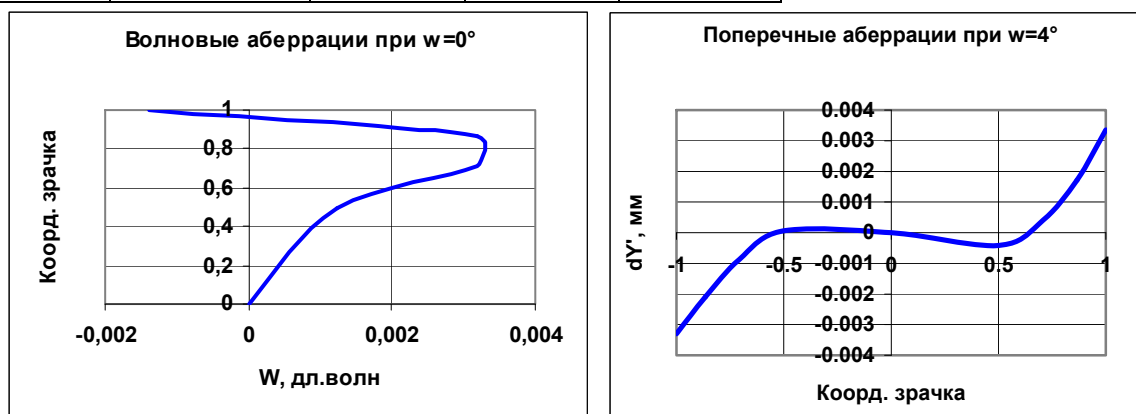


Рис.11 – Абберации нецентрированной трёхзеркальной оптической системы с вторичным зеркалом сферической формы



#### Глава 4. Анализ требований к элементам адаптивных оптических систем

Для изменения профиля отражающей поверхности путём прогиба зеркала оно должно быть достаточно гибким. При компенсации атмосферной деформации волнового фронта путём наклона и осевого смещения зеркального элемента синтезированной апертуры прогиб этого элемента под действием собственного веса должен быть пренебрежимо мал. Рассмотрим условия, при которых зеркало следует считать гибким, и условия, при которых можно считать, что форма отражающей поверхности зеркала остаётся неизменной под действием собственного веса.

Прогиб  $\delta$  свободно опертой круглой пластины диаметром  $D$  и толщиной  $h$ , изготовленной из материала с модулем упругости  $E$ , коэффициентом Пуассона  $\mu$  и плотностью  $\gamma$ , равен:

$$\delta = G \frac{D^2}{q^2} \left( 1 - \rho^2 \right) \left( \frac{5 + \mu}{1 + \mu} - \rho^2 \right), \text{ где } q = \frac{h}{D}; \quad G = \frac{3}{256} \frac{1 - \mu^2}{E} \gamma; \quad \rho = \frac{r}{r_0} = 2 \frac{r}{D};$$

$r$  – расстояние от оси до произвольной точки поверхности круглой пластины, при этом  $0 < \rho < 1$ .

При этом плоский волновой фронт, падающий на отражающую поверхность, принимает форму, отклонение которой от плоскости равно

$$W_p(\rho) = 2(\delta_0 - \delta) = 2G \frac{D^2}{q^2} \rho^2 \left( \frac{5 + \mu}{1 + \mu} + 1 - \rho^2 \right)$$

Для заданного числом Штреля  $S_t$  качества изображения при условии компенсации сферичности волнового фронта перефокусировкой отношение толщины зеркала к его диаметру определяется выражением:

$$q_0 \geq D \sqrt{\frac{2\pi}{15\lambda} G} \sqrt{\frac{5}{1 - S_t}} \quad \text{Если } S_t \geq 0.8, \text{ то } q_0 \geq D \sqrt{\frac{2G}{\lambda}}.$$

Изменение положения трубы телескопа в процессе наведения приводит к отклонению оси зеркала от нормали к поверхности Земли, следовательно, изменяется величина и форма прогиба зеркала. Поэтому условие стабильности отражающей поверхности зеркала без учёта возможной перефокусировки изображения определяется выражением:

$$q < 2q_0 \sqrt[4]{\Psi}, \text{ где } \Psi = 1 + \frac{15}{2} \frac{3 + \mu}{(1 + \mu)^2}; \quad q_0 = D \sqrt{\frac{2G}{\lambda}}.$$

Если предположить, что зеркало изготовлено из стекла «пирекс 316», а  $\lambda = 0.55 \cdot 10^{-3}$  мм, то прогиб отражающей поверхности не превысит допустимой величины, если отношение толщины зеркала к диаметру  $q_0 \geq 0.125 \cdot D$  (м). Если принять  $D = 0.2$  м, то  $q_0 = 0.025$ . Таким образом, при  $q_0 < 0.025$  и  $D > 0,2$  м зеркало можно считать гибким.

Главное зеркало телескопа БТА имеет  $D=6050$  мм, а  $h=650$  мм.

Учитывая соотношение  $\frac{q_1}{q_2} = \frac{D_1}{D_2}$ , находим, что зеркало диаметром

$D=1000$  мм имеет прогиб той же величины, что и зеркало БТА, при  $h=17,8$  мм. Заметим, что для сохранения отражающей поверхности зеркала

БТА применяется весьма сложная система разгрузки зеркала. Для сохранения поверхности зеркала неизменной при  $D=1$  м величина отношения  $q_0=0,125$ , т.е. толщина зеркала  $h=125$  мм. При плотности стекла  $\gamma = 2,48 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  масса такого зеркала приближённо равна 244 кг. При ребристой форме тыльной стороны зеркала технологически возможно облегчение зеркала до четырёх раз. Примерно во столько же раз уменьшится его прогиб. Следовательно, такое зеркало вполне можно применить в качестве элемента синтезированной апертуры.

Характеристики некоторых материалов, применяемых для изготовления зеркал, приведены в таблице.

Параметры	Материалы						
	<i>Be</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Si</i>	<i>SiC*</i>	Пирекс 316
Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	1,85	2,7	8,9	10,2	2,3	3,05	2,48
Модуль упругости $E \cdot 10^{-3}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	30	7,5	12	35	17	42	6,685
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·град)	159	220	400	145	160	185	1,0
$OTKLP \alpha^{-6}$ , 1/град	11,4	23,9	16,5	5,0	2,5	2,5	3,0
$\frac{\alpha}{\lambda} \cdot 10^{-8}$ м/Вт	7,2	10,9	4,1	3,4	1,6	1,4	3,0
$\tilde{q}_0$	0,05	0,12	0,17	0,11	0,08	0,06	0,125

При компенсации возмущений волнового фронта, вносимых турбулентной атмосферой, путём наклонов и осевых подвижек элементов синтезированной апертуры необходимо знать допустимую погрешность позиционирования отдельных элементов для достижения требуемого качества изображения. Для нахождения этих величин функцию, описывающую волновой фронт, отраженный от поверхности элемента составного зеркала, удобно разложить в ряд по полной системе полиномов, ортогональных внутри единичного круга, например, по круговым полиномам Цернике, полагая отличной от нуля волновую aberrацию, определяемую коэффициентами  $A_{00}$  (фазовое смещение (сдвиг)),  $A_{20}$  (расфокусировка) и  $A_{11}$  (наклон).

Значение нормированной интенсивности в изображении осевой точки в этом случае описывается выражением:  $S \cong \tilde{S} - k^2 \Delta W_{СКВ}^2$ , где  $W_{СКВ}$  – среднеквадратическое отклонение волнового фронта, определяемое совместным влиянием остаточных aberrаций оптической системы и отклонений формы поверхностей элементов синтезированной апертуры;  $\tilde{S}$  – число Штреля, определяемое влиянием погрешностей позиционирования элементов синтезированной апертуры оптической системы. При одинаковой

величине и форме элементов синтезированной апертуры математическое ожидание и дисперсия числа Штреля определяются выражениями:

$$M[\tilde{S}] \cong 1 - k^2 \left( \frac{N-1}{N} \sigma_{00}^2 + \frac{1}{6} \sigma_{20}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{11}^2 \right)$$

$$D[\tilde{S}] \cong \frac{2k^4}{N} \left[ \frac{N-1}{N} \sigma_{00}^4 + \frac{1}{36} \sigma_{20}^4 + \frac{1}{16} \sigma_{11}^4 \right]$$

Если положить допустимую величину числа Штреля  $S_{доп} = 0.8$ , количество субапертур  $N=6$ ,  $\sigma_{20}^2 = 6\sigma_{00}^2$  и  $\sigma_{11}^2 = 4\sigma_{00}^2$ , получаем  $\sigma_{00} \leq \frac{\lambda}{34} \left( A_{00} \leq \frac{\lambda}{11}, A_{20} \leq \frac{\lambda}{5}, A_{11} \leq \frac{\lambda}{6} \right)$ , где  $\sigma_{11}, \sigma_{00}, \sigma_{20}$  – среднее квадратическое отклонение случайной величины коэффициентов  $A_{00}, A_{20}$  и  $A_{11}$ .

### **Заключение**

Цель диссертационной работы, – разработка теоретических основ обоснованного выбора принципиальной схемы оптической системы адаптивного телескопа, достигнута, сформулированные задачи исследования выполнены. В процессе выполнения работы получены следующие результаты:

1. В оптической схеме телескопа, представляющей собой сочетание независимых объективов, плоскости изображения, образованные ими, наклонены друг к другу, равно как и к общей плоскости регистрации изображения. Показано, что принципиально наклон изображений можно компенсировать наклоном оптических осей объективов, однако при этом фазового сопряжения изображений достичь невозможно.
2. Показано, что в оптической схеме телескопа, образованной сочетанием афокальных модулей, нет принципиальных проблем с фокусировкой и фазовым сопряжением образованных отдельными модулями изображений.
3. В работе приведён разработанный метод параметрического синтеза трёхзеркальной оптической системы без центрального экранирования световых пучков лучей (с внеосевым ходом лучей) с одним из компонентов сферической формы.
4. Применение параметрической модели трёхзеркальной оптической системы позволяет решать не только задачу параметрического синтеза системы без центрального экранирования, но и решать задачу компромиссной увязки габаритных параметров системы с характером коррекции аберраций и с требуемой формой отражающих поверхностей.
5. В работе приведена сравнительная характеристика материалов, применяемых для изготовления оптических зеркал, которая позволяет ориентироваться при выборе требуемого материала зеркал разрабатываемой системы.

6. Приведённые в работе аналитические соотношения определяют возможность обоснованного выбора требований к системе позиционирования элементов составного главного зеркала.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы**

1. Гордин С.А., Воронцов Д.Н., Гайворонский С.В. «Композиция и параметрический синтез модифицированных вариантов зеркальной системы объектива Грегори», сборник тезисов докладов VII конференции молодых ученых «Оптехника и оптическое приборостроение», вып.2, с.19-20;
2. Гайворонский С.В. «Проблемы композиции оптических систем адаптивных телескопов», сборник тезисов докладов VIII конференции молодых ученых «Оптехника и оптическое приборостроение», вып.2, с.27-28.
3. Гайворонский С.В., Зверев В.А. «Варианты композиции зеркальных объективов на основе оптической системы объективов Грегори и Кассегрена», «Оптический журнал» 2012, №2;
4. Гайворонский С.В., Зверев В.А. «Анализ коррекционных параметров оптической системы из трех отражающих поверхностей», «Приборостроение», 2012, №3, с.42-47.

Тиражирование и брошюровка выполнены в учреждении  
«Университетские телекоммуникации»  
197101, Санкт-Петербург, Саблинская ул., 14  
Тел. (812) 233 46 69, Объем 1,0 у.п.л.  
Тираж 100 экз.