

УДК 520.2

Исследование оптики 60-см телескопа Цейса

Э. А. Витриченко

Методом Гартмана исследована оптика 60-см телескопа Цейса, установленного на горе Кошка у пос. Симеиз. Анализ показал, что у телескопа имеется кома децентрировки, устранение которой уменьшает радиус кружка рассеяния в 1.5 раза. 50 % энергии концентрируется в кружке диаметром 1.0". Среднее квадратичное нормальное отклонение оптической поверхности после устранения комы достигает 0.056 мкм. Средняя квадратичная ошибка построения карты нормальных отклонений по трем пластинкам равна 0.026 мкм. Радиальная средняя квадратичная ошибка составляет 10 % общей средней квадратичной ошибки. Предложен экспрессный метод определения комы децентрировки и величины самой децентрировки. Смещение вторичного зеркала с оси главного для 60-см телескопа составляет 1.7 ± 0.1 мм, а для 2-м телескопа (НРБ) 0.2 ± 0.1 мм.

TESTING THE OPTICS OF THE 60 cm ZEISS TELESCOPE, by Vitrichenko E. A. — The optics of the 60 cm Zeiss telescope was tested by Hartmann's method. The telescope was mounted near Simeiz (Crimea, Mount Koshka). An analysis suggests that there is a decentering coma. Correction of this coma would increase the light concentration by a factor of 1.5. This concentration will be 1.0" for the 50 % energy level. The standard deviation for optical surface of primary mirror will be 0.056 μ m after coma elimination. The standard error for Hartmann's method is 0.026 μ m for the mean of three realizations. The radial optical surface error is 10 % with respect to the total error. The express method for decentering coma determination is given. The value of the second mirror decentering is 1.7 ± 0.1 mm for the 60 cm Zeiss telescope and 0.2 ± 0.1 mm for the 2 m telescope (Bulgaria).

Введение. В 1984 г. на горе Кошка у пос. Симеиз установлен 60-см телескоп Цейса. Он предназначен для использования в качестве питающей оптики адаптивной оптической системы.

Исследования атмосферы, выполненные в [5], показали, что при диаметре телескопа 60 см нет необходимости компенсировать никакие другие aberrации, кроме наклонов волнового фронта (дрожания звезды). После устранения наклонов реализуется теоретический предел разрешения. Однако этой реализации может препятствовать качество оптики самого телескопа. Поэтому перед использованием телескопа в составе адаптивной оптической системы необходимо исследовать эту оптику в целях проверки, можно ли с таким качеством оптики реализовать теоретическую адаптацию, а если нельзя, то какой ее предел достигим с оптикой данного качества.

Пусть атмосферная нестабильность при длительной экспозиции создает в фокусе телескопа изображение звезды диаметром 3" на уровне 50 % энергии [5]. Из теории атмосферной турбулентности следует [10], что путем компенсации наклонов в реальном времени (дрожания звезды) изображение может быть улучшено в 2.7 раза, т. е. можно уменьшить диаметр изображения от 3 до 1.1". Эксперименты показали [5], что на практике достижимо улучшение не в 2.7 раза, а в 5 раз, т. е. до 0.6". Это связано с тем, что качество изображения ухудшается не только атмосферной нестабильностью, но и другими причинами.

Теоретический предел для телескопа диаметром 60 см при длине волны 0.5 мкм составляет 0.25". Отсюда следует требование к качеству оптики телескопа — разрешение, создаваемое оптикой, должно быть не более чем в два раза хуже теоретического предела.

Цель нашей работы — исследование оптики 60-см телескопа Цейса и проверка его пригодности для работы в составе адаптивного телескопа. В СССР есть несколько подобных телескопов, но только для одного из них опубликованы сведения о распределении энергии в кружке рассеяния [7].

Методика исследования телескопа. Исследование оптики телескопа состояло из двух этапов. Первый этап — получение и анализ теневых картин. Рассмотрение теневых картин позволило сделать следующие выводы: 1. Основная ошибка оптики телескопа — общая ошибка; 2. Поскольку зональная структура едва заметна, то классической обработкой

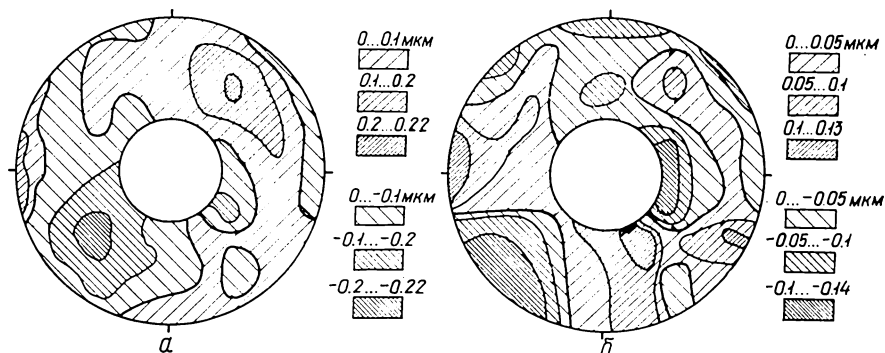


Рис. 1. Карты нормальных отклонений оптической системы 60-см телескопа Цейса: а — оригинальная; б — без комы децентрировки

вряд ли можно улучшить оптическую поверхность, необходимо применять автоматизированную локальную ретушь [3]; 3. Если проследить производные волнового фронта (яркость теневой картины) в юго-восточных и северо-западных частях снимков, то можно объяснить их поведение наличием значительной комы; 4. Изображение спайдеров неодинаково, что также заставляет предположить кому децентрировки, так как в этом случае лучи, создающие изображение в центре поля зрения, попадают на главное зеркало под косым углом, и виньетирование спайдерами оказывается различным для разных спайдеров.

Второй этап — получение и анализ снимков Гартмана. Для получения снимков на переднем срезе трубы телескопа устанавливалась диафрагма Гартмана типа 2 [1], но смещенная на половину расстояния между центрами отверстий на юг и восток. Это смещение необходимо потому, что в диафрагме типа 2 вдоль диаметров расположены отверстия, которые будут виньетироваться спайдерами. Смещение диафрагмы позволяет избежать виньетирования.

За фокусом телескопа на расстоянии 150 мм располагалась кассета с фотопластинкой. Выбирались звезды 3—4^м, чтобы экспозиция составляла примерно 1 мин. При этом снимки были слегка недодержанными, что удобно при их измерении. Всего получено 20 снимков, из них отобраны № 9, 10 и 11 — наилучшие по качеству. Эти снимки измерялись на приборе «Аскорекорд» и обрабатывались по программе HART 4 [8].

Анализ карты нормальных отклонений. По трем указанным пластинкам построены три карты нормальных отклонений. Карты относятся к оптической системе «главное зеркало+вторичное», но в дальнейшем будем рассматривать нормальные отклонения главного зеркала, условно полагая, что вторичное зеркало не вносит аберраций.

Все карты очень сходны, что свидетельствует о достоверности результатов. Наиболее заметные явления на картах — бугор на северо-востоке и яма на юго-западе. Эти детали характеризуют кому.

Для определения ориентации комы на всех картах проведены прямые, соединяющие центры бугра и ямы и проходящие через центр зер-

кала. Угол, составленный этими прямыми с направлением на восток, в среднем равен: $\theta_0 = 0.82 \pm 0.01$ рад, где рядом со значением угла приведена средняя квадратичная ошибка результата.

Затем карты были усреднены, в результате чего получена карта, представленная на рис. 1, а. Кома устранена численно. Для этого методом наименьших квадратов определялись коэффициенты a_i уравнения

$$h_k(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3\rho^2 + a_4\rho^3 \cos(\theta - \theta_0), \quad (1)$$

где x, y — координаты центров отверстий диафрагмы Гартмана в проекции на главное зеркало; $\rho^2 = x^2 + y^2$; $\theta = \text{arctg}(x/y)$. Карта зеркала $h(x, y)$, освобожденная от комы децентрировки, получается по формуле

$$h(x, y) = h_0(x, y) - h_k(x, y), \quad (2)$$

где $h_0(x, y)$ — карта нормальных отклонений оптической системы плюс кома децентрировки, т. е. исходная карта. Значения коэффициентов a_i , входящих в формулу (1), оказались следующими: $a_0 = -0.7$; $a_1 = 2.94$; $a_2 = 3.39$; $a_3 = 0.004$; $a_4 = -0.051$ (h_k — в 0.01 мкм, а x и y —

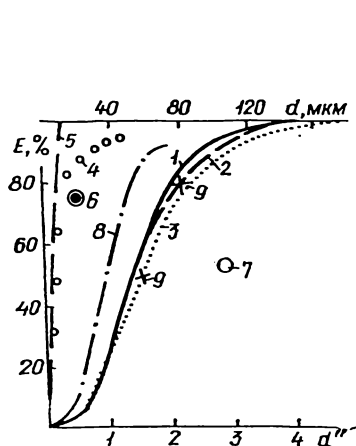


Рис. 2. Распределение энергии в кружке рассеяния

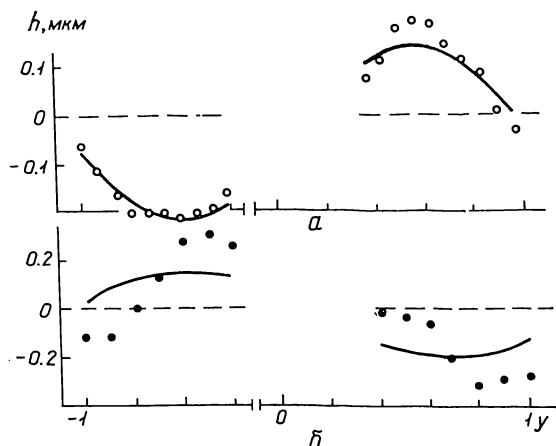


Рис. 3. Зависимость нормальных отклонений от радиуса главного зеркала (в относительных единицах): а — 60-см телескоп Цейса; б — 2-м телескоп (НРБ). Кружки — наблюдения, кривые — аппроксимация наблюдений зависимостью (4)

в единицах базы диафрагмы, которая в нашем случае составляет 30 мм). Для упрощения расчетов осями зеркала приняты 10-й столбец и 10-я строка карты нормальных отклонений.

Карта зеркала, вычисленная по формуле (2), показана на рис. 1, б. Градации высот карты в два раза уменьшены по отношению к первоначальной карте (рис. 1, а). Из рис. 1, б можно сделать такие выводы: 1) основные ошибки оптической системы после устранения комы имеют локальный характер. Эти ошибки сложно устранить классической технологией, необходимо применять автоматизированные системы локальной ретуши [3]; 2) зональная составляющая ошибок не заметна; 3) в первом квадранте осталась яма, а в третьем — бугор, но высота их в два раза меньше, их расположение не имеет осевой симметрии, т. е. они наполированы; 4) до устранения комы средняя квадратичная ошибка поверхности составляла 0.090 мкм, а после устранения — 0.056 мкм, т. е. уменьшилась в 1.6 раза.

Анализ кружка рассеяния. По программе HART 4 [8] вычисляется и выдается на печать в табличной форме точечная диаграмма. Таблицы используются для построения точечной диаграммы на плоскости, а за-

тем известным способом [1] получают кривые распределения энергии в кружке рассеяния.

На рис. 2 кривые 1—3, полученные по пластинкам соответственно № 9, 10 и 11, показывают распределение энергии в кружке рассеяния; 4 — теоретическое распределение энергии для идеального 60-см телескопа при длине волны 0.5 мкм, центральное экранирование не учитывалось; штриховая линия 5 — распределение энергии, которое получилось бы в случае идеальной оптики телескопа, но при среднем квадратичном смещении каждого пятна от идеального положения на 6.6 мкм. Именно такая точность реализована в практике измерений; 6 — техническое задание; 7 — концентрация энергии на уровне 50 %, создаваемая атмосферой, согласно результатам [5]; кривая 8 — распределение энергии после исключения комы децентрировки; крестики 9 — результаты исследования другого 60-см телескопа Цейса [7].

Из рис. 2 можно сделать следующие выводы: 1) результаты измерений по трем различным пластинкам хорошо согласуются между собой. Так, для уровня энергии 50 % диаметр кружка в среднем равен 1.4" со средней квадратичной ошибкой одного определения 0.14". Если усреднить поперечные aberrации по трем пластинкам и построить кривую концентрации энергии, то она практически совпадет с кривой 1; 2) оптика телескопа далеко не удовлетворяет техническому заданию. Для уровня 80 % и при исключении комы это расхождение составляет 2.3 раза. Еще больше расхождение для 60-см телескопа Цейса, установленного на горе Майданак; 3) компенсация наклонов в реальном времени позволит после устранения комы улучшить изображение в три раза, т. е. оптика телескопа позволит реализовать теоретически возможную компенсацию (2.7 раза) [10]. Установленный на горе Майданак 60-см телескоп Цейса невозможно использовать в качестве питающей оптики для адаптивного телескопа, поскольку здесь атмосфера позволяет получить лучшие изображения, чем дает оптика телескопа [7]; 4) без устранения комы децентрировки возможно улучшение качества изображения за счет компенсации дрожаний только в два раза, т. е. нельзя реализовать теоретическое улучшение изображения; 5) точность, которая в данном случае реализована методом Гартмана, позволяет аттестовать оптику телескопа даже в случае, если бы она оказалась близкой к теоретическому пределу.

Ошибка построения карты. В данной реализации метода Гартмана нормальные отклонения в каждой точке оптической поверхности определяются дважды: на горизонтальных и вертикальных профилях после приведения их к общему нуль-пункту. Ошибкой построения карты считаем величину σ , определяемую по формуле

$$\sigma = 0.5 |h_x - h_y|,$$

где h_x и h_y — нормальные отклонения соответственно на горизонтальном и вертикальном профилях.

Программа NART 4 определяет не только среднюю ошибку построения карты, но и ошибки для пяти кольцевых зон шириной 0.2 радиуса оптической поверхности. Проанализируем ошибки построения карты по данным таблицы, в которой даны ошибки построения карты по зонам, начиная с зоны 0.2—0.4 радиуса. В зоне 0—0.2 ошибка не определялась, так как зеркало имеет центральное отверстие. Кроме того, в таблице приведены средняя ошибка построения карты σ_{cp} и средняя квадратичная ошибка оптической поверхности σ_1 , в двух последних строках даны средняя ошибка одного определения σ_2 и ошибка среднего из трех измерений σ_3 .

Из таблицы следуют выводы: 1) средняя квадратичная ошибка усредненной карты (0.026 мкм) значительно меньше ошибки оптической поверхности (0.096 мкм), т. е. карта строится достоверно; 2) на краю оптической поверхности ошибка построения карты в 1.5 раза больше,

чем в центре. Это может зависеть от особенностей методики построения карты.

Графическое определение комы децентрировки. Положение вторичного зеркала относительно главного определяется пятью параметрами: расстоянием между вершинами зеркала, двумя наклонами и смещением по двум координатам вершины вторичного зеркала.

Расстояние между вершинами зеркал имеет допуск порядка 100 мм. Его несложно установить и корректировать, поскольку вторичное зеркало имеет подвижку вдоль оптической оси телескопа.

Ошибка построения карты (σ , мкм)

Номер пластинки	Зона				$\sigma_{\text{ср}}$	σ_1
	0.2—0.4	0.4—0.6	0.6—0.8	0.8—1.0		
9	0.031	0.030	0.051	0.055	0.048	0.092
10	0.046	0.044	0.041	0.046	0.044	0.094
11	0.035	0.037	0.043	0.046	0.042	0.101
σ_2	0.037	0.037	0.045	0.049	0.045	0.096
σ_3	0.022	0.022	0.026	0.029	0.026	

Оба наклона вторичного зеркала можно делать вокруг нейтральной точки [6], что не меняет качества изображения и не вводит ошибок в волновой фронт. Конструктивно вторичное зеркало крепится так, что его наклоны осуществляются вращением вокруг нейтральной точки. Однако при таком вращении происходит смещение вершины вторичного зеркала, и при каждом акте наклона необходимо одновременно возвращать вершину на ось главного зеркала.

Смещение вершины вторичного зеркала с оси главного зеркала приводит к коме децентрировки. Одновременно наблюдается еще одно явление. Осевой луч уходит из центра поля зрения. Если наклоном вторичного зеркала вернуть его в центр, то в центре поля зрения окажется звезда, не находящаяся на оси главного зеркала, лучи от нее падают под углом к оптической оси главного зеркала. По этой причине происходит виньетирование части диафрагмы Гартмана главным зеркалом, по этой же причине спайдеры на теневых картинах имеют специфическое изображение.

Рассмотрим методику экспрессного определения комы децентрировки. Необходимо определить направление и величину смещения вторичного зеркала. Направление смещения мы уже определили выше. Для определения величины смещения используем уравнение (5.35) из [6]:

$$x = \frac{1}{2r_0} y^2 + \frac{1}{8} \frac{1-e^2}{r_0^3} y^4 + \dots, \quad (3)$$

где x и y — координаты на поверхности вторичного зеркала; r_0 — его радиус кривизны при вершине; e — эксцентриситет. Дифференцируя (3) и отбрасывая линейный член, получаем

$$\Delta x = \frac{1}{2} \frac{1-e^2}{r_0^3} y^3 \Delta y,$$

откуда находим величину Δy , которая характеризует смещение вторичного зеркала с оси главного.

На практике действуем в такой последовательности. Получаем карту нормальных отклонений по программе HART 4. На ней определяем направление комы, соединяя центр бугра с центром ямы прямой, проходящей через центр карты. Вдоль этой прямой отсчитываем нормаль-

ные отклонения и строим функцию $h(y)$, которую аппроксимируем выражением

$$h(y) = a_0 + a_1 y + a_2 y^2 + a_3 y^3, \quad (4)$$

где координата y относится к главному зеркалу. Методом наименьших квадратов вычисляем коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 . Коэффициент a_3 используем для определения смещения вторичного зеркала

$$\Delta y = \frac{2r_0^3 a_3}{1 - e^2} \alpha^3,$$

где $\alpha = D_1/D_2$ — отношение диаметров главного и вторичного зеркал.

На рис. 3 приведены примеры зависимостей $h(y)$ для 60-см телескопа и 2-м телескопа (НРБ) [2]. Сплошными кривыми показаны зави-

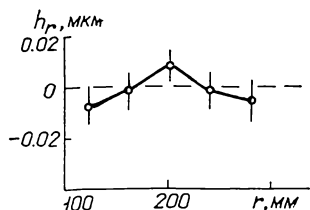


Рис. 4. Зависимость радиальной составляющей ошибки оптической поверхности от радиуса оптической поверхности

симости (4). Смещения вторичных зеркал для этих телескопов оказались равными $\Delta y = 1.7 \pm 0.1$ и $\Delta y = 0.2 \pm 0.1$ мм. Направление смещения для 2-м телескопа составляет угол 0.76 рад с направлением на запад; у 60-см телескопа зеркало надо сместить к юго-востоку. Юстировка этих телескопов существенно улучшит качество изображения, создаваемое самой оптикой.

Методика юстировки кассегреновского телескопа на примере 1-м телескопа Цейса описана в работе [4].

Соотношение между локальными и радиальными ошибками. Это соотношение играет важную роль для оптической технологии. Дело в том, что оптики-мастера могут успешно выполнять зональную ретушь зеркала, но для устранения локальных ошибок необходимо применять принципиально новую технологию; например, отечественные технологические системы «Зебра» [3], станки типа АД, зарубежные системы CAOS [9] и ССР [11].

Для исследования зональной составляющей ошибок оптической поверхности вся поверхность от центрального отверстия до наружного края была разделена на пять кольцевых зон шириной 40 мм. Внутри каждой зоны определялось среднее нормальное отклонение

$$h_r = \Sigma h_{i,k} / n_r,$$

где $h_{i,k}$ — нормальное отклонение в узле, попадающем внутрь кольцевой зоны; n_r — число таких узлов. Определялась также средняя квадратичная ошибка σ_r величины h_r :

$$\sigma_r = \{\Sigma h_{i,k}^2 / [n_r (n_r - 1)]\}^{1/2}.$$

Зависимость h_r от r представлена на рис. 4. Отрезками прямых показана σ_r . Из этого рисунка видно, что радиальная составляющая ошибок пренебрежимо мала.

Оценим численно вклад радиальных ошибок в общую ошибку оптической поверхности. Зональная средняя квадратичная ошибка оптической поверхности σ_2 с учетом веса каждой зоны вычисляется по формуле $\sigma_2 = (\Sigma r h_r^2 / \Sigma r)^{1/2}$ и равна 0.0055 мкм. Для усредненной карты с вычитенной комой средняя квадратичная ошибка составляет $\sigma_1 = 0.056$ мкм. Введем критерий вклада зональных ошибок в виде отношения $\Lambda = \sigma_1 / \sigma_2 = 0.1$, т. е. в нашем случае радиальные ошибки составляют всего 10 % суммы

всех ошибок. Это автоматически означает, что оптики-мастера́ исчерпали свои возможности по улучшению оптической поверхности. Ее дальнейшее улучшение возможно только путем применения автоматизированных технологических систем.

Заключение. Исследование оптики 60-см телескопа Цейса позволяет сделать следующие выводы: 1. Телескоп пригоден для использования в составе адаптивного телескопа, исправляющего наклоны волнового фронта, при условии исправления комы децентрировки; 2. Качество оптики телескопа характеризуется концентрацией 50 % энергии в кружке диаметром 1.0" при условии устранения децентрировки; 3. При данном качестве оптики телескоп нельзя использовать в составе адаптивного телескопа, устраняющего аберрации более высоких порядков, например сферическую аберрацию. Для такого применения оптику необходимо улучшить хотя бы в два раза; 4. Основные ошибки поверхности имеют локальный характер, чисто зональная составляющая пренебрежимо мала.

1. *Витриченко Э. А.* Методы исследования астрономической оптики.— М.: Наука, 1980.—152 с.
2. *Витриченко Э. А.* Современное состояние и перспективы улучшения оптики крупных телескопов // Астроклимат и эффективность телескопов.— Л.: Наука, 1984.— С. 10—17.
3. *Витриченко Э. А., Прохоров А. М., Трушин Е. В.* Методы изготовления астрономической оптики.— М.: Наука, 1980.—196 с.
4. *Дудинов В. Н., Новиков С. Б., Шульга В. В.* О методе юстировки кассегреновского телескопа // Астрон. циркуляр.— 1984.— № 1307.— С. 4—6.
5. *Масленников К. Л.* Приложение метода Гартмана в астрономической адаптивной оптике: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.— М., 1984.— 18 с.
6. *Михельсон Н. Н.* Оптические телескопы.— М.: Наука, 1976.— 510 с.
7. *Новиков С. Б., Овчинников А. А., Шульга В. В.* О методе измерения частотно-передаточной функции оптического тракта телескоп— атмосфера // Астроклимат и эффективность телескопов.— Л.: Наука, 1984.— С. 73—80.
8. *ОСТ 88 0.091.120—83.* Системы оптические крупногабаритные. Метод контроля.— Введ. 01.01.84.
9. *Aspden R., McDonough R., Nitchie F. R.* Computer assisted optical surfacing // Appl. Opt.— 1972.—11, N 12.— P. 2739—2747.
10. *Greenwood D. P., Fried D. L.* Power spectra requirements for wavefront-compensative systems // J. Opt. Soc. Amer.— 1976.—68, N 2.— P. 193—206.
11. *Jones R. A.* Fabrication using the computer controlled polisher // Appl. Opt.— 1978.—17, N 12.— P. 1889—1892.

Ин-т космич. исследований АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию 21.10.86,
после доработки 20.04.87