

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Э. А. Витриченко, В. Е. Зуев, В. П. Лукин,
Л. А. Пушной, Анализ ошибок оптики крупных те-
лескопов,
Докл. АН СССР, 1988, том 300, номер 2, 312–315

<https://www.mathnet.ru/dan48280>

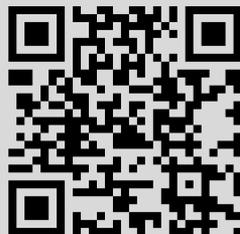
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.85

19 мая 2025 г., 02:40:41



Э.А. ВИТРИЧЕНКО, академик В.Е. ЗУЕВ,
В.П. ЛУКИН, Л.А. ПУШНОЙ

АНАЛИЗ ОШИБОК ОПТИКИ КРУПНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

К настоящему времени накопилось много материала по исследованию ошибок оптики крупных телескопов [5]. В работе предпринята попытка проанализировать эти материалы с целью выяснения возможностей оптической технологии и выработки рекомендаций по дальнейшему улучшению астрономической оптики.

Бурное развитие адаптивной оптики открывает возможности как устранения влияния атмосферы на качество изображения астрономического телескопа, так и компенсации ошибок изготовления его оптики. Для эффективного решения этих задач также необходимо выполнить анализ наиболее характерных ошибок оптики реальных телескопов.

Мы собрали все опубликованные карты оптики телескопов [2-4, 7-11]. В табл. 1 приведены: обозначение телескопа; диаметр главного зеркала в метрах; название телескопа и место его установки [5]. Звездочкой отмечены телескопы, для которых данные относятся к системе "главное зеркало + вторичное", для остальных телескопов данные относятся к главному зеркалу. В четвертой колонке указан литературный источник. Карта под номером *i* (Цейсс-600, Симеиз) получена нами. Карта *bb*, СТ10 нами не обрабатывалась, так как в публикации она приведена с крупным шагом между уровнями и не содержит деталей.

Обработка всех карт заключалась в следующем. Каждую карту приводили к минимальному значению среднеквадратичного нормального отклонения [1]:

$$(1) \quad h_0 = h - [a_0 + a_1x + a_2y + a_3(x^2 + y^2)],$$

где h — отклонения исходной карты в точке (x, y) , а x, y — координаты на главном зеркале; коэффициенты a_i определяются методом наименьших квадратов.

Затем вычисляли среднеквадратическое нормальное отклонение по всем точкам карты:

$$(2) \quad \sigma_k = \sqrt{\frac{\sum h_0^2}{N-1}},$$

где N — число узлов на карте, k — индекс, обозначающий тип ошибки. При $k = 0$ имеем σ_0 , характеризующую карту зеркала после приведения к ближайшей сфере (см. табл. 1).

Наилучшими по параметру σ_0 являются линзовый объектив *h*, а из зеркальных телескопов — *bb*, *d* и *i*, *e*.

Величина σ_2 — среднеквадратическое отклонение для оптики после удаления астигматизма:

$$(3) \quad h_2 = h_0 - a_4(x^2 + y^2) \cos [2(\varphi - \varphi_0)],$$

где φ_0 — угол положения оси астигматизма, величины φ_0 и a_4 определяются методом наименьших квадратов [1, 6]. Лучшим из зеркальных телескопов здесь оказывается телескоп Цейсс-2000 г.

Таблица 1

Характеристики оптики крупных телескопов

Обозначение	D, м	Название, страна	Источник	Среднеквадратическое нормальное отклонение σ_k , мкм				
				k = 0	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4
a	0,6	БТА-2, САО, СССР	[7]	0,145	0,105	0,128	0,120	0,145
b	4,0	Китт Пик, США	[9]	0,211	0,180	0,211	0,112	0,210
bb	4,0	СТ10, Чили		0,039	—	—	—	—
c	3,6	ЕЮО, Чили	[8]	0,281	0,200	0,199	0,280	0,281
d	3,0	Лик, США	[10]	0,086	0,059	0,085	0,069	0,082
e	2,6	ЗТШ-1, КрАО, СССР	[3]	0,087	0,052	0,081	0,081	0,085
f	2,6	ЗТШ-2, КрАО, СССР	[2]	0,246	0,233	0,116	0,244	0,230
g	2,0	Цейсс-2000* Рожен, НРБ	[2]	0,105	0,043	0,102	0,098	0,104
h	0,76	БСВТ, СССР, Байкал	[1, 4]	0,027	0,018	0,021	0,026	0,027
i	0,6	Цейсс-600* Симеиз, СССР		0,087	0,071	0,087	0,054	0,086
Среднее				0,163	0,130	0,127	0,145	0,160

Среднеквадратическая ошибка σ_3 характеризует оптическую поверхность после устранения комы:

$$(4) \quad h_3 = h_0 - a_5(x^2 + y^2)^{3/2} \cos(\theta - \theta_0),$$

где θ — горизонтальный угол на оптической поверхности, показывающий разворот оси аберрации в координатах поверхности. Величины θ_0 и a_5 определяются методом наименьших квадратов [6]. Наилучшим зеркалом после устранения комы является зеркало телескопа Цейсс-600 i.

В последней колонке табл. 1 приведена величина σ_4 , характеризующая поверхность, которая получается после устранения из карты зональной ошибки. Для определения последней зеркало разбиваем на равновеликие по площади зоны, для каждой из них вычисляем среднее по всей зоне значение нормальных отклонений h_r . Карта, полученная по такому среднему профилю, вычиталась из карты, характеризующей параметром σ_0 :

$$(5) \quad h_4 = h_0 - h_r.$$

После вычитания зональных ошибок наилучшими остаются объектив БСВТ h и зеркало d Ликской обсерватории.

Величина σ_1 , приведенная в табл. 1, получалась по карте, из которой вычитались местные ошибки [6]:

$$(6) \quad h_1 = h_0 - (h_2 + h_3 + h_4).$$

И в этом случае объектив БСВТ остается лучшим, а из зеркальных систем выделяются Лик и ЗТШ-1, Цейсс-2000. Величина σ_1 для всех рассмотренных телескопов, за исключением зеркал c и f, является наименьшей по сравнению с величинами σ_2 , σ_3 и σ_4 . Это означает, что локальные ошибки преобладают над другими типами ошибок.

На рис. 1 это можно проследить по ходу нормированных локальной (кривая 1) и зональной (кривая 2) ошибок. Нормировка велась на величину σ_0 . Данные рис. 1 позволяют сделать два основных вывода: локальные ошибки телескопов

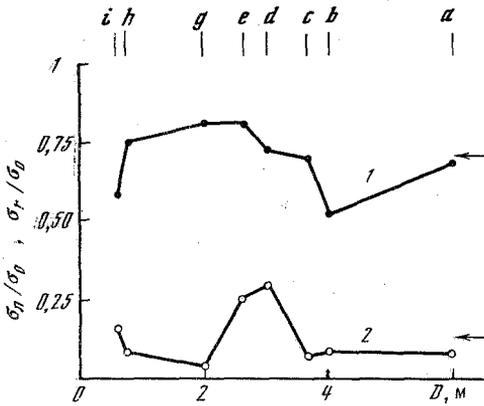


Рис. 1. Зависимость от диаметра среднеквадратической ошибки оптики телескопа, нормированной на полную ошибку σ_0 . 1 — локальная, 2 — зональная составляющие полной ошибки. Стрелками справа показаны средние значения для приведенных кривых

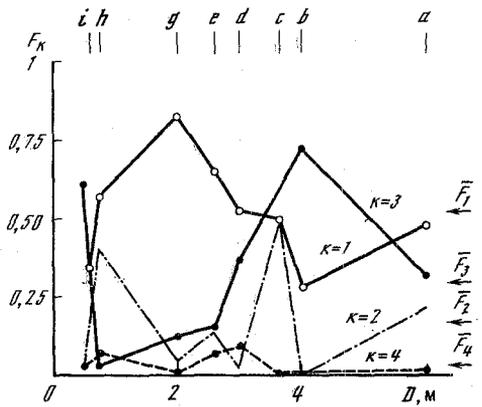


Рис. 2. Функции вклада F_k различных ошибок оптики телескопов в полную ошибку: $k=1$ — локальная ошибка, $k=2$ — астигматизм, $k=3$ — кома, $k=4$ — зональная ошибка. Стрелками справа показаны средние значения вкладов \bar{F}_k

существенно больше зональных; ни локальная, ни зональная ошибки от диаметра телескопа не зависят.

Для оценки вклада различных ошибок телескопа в полную ошибку на рис. 2 построены функции вкладов F_k ошибок следующих типов: $k=1$ — локальная, $k=2$ — астигматизм, $k=3$ — кома, $k=4$ — зональная, в зависимости от диаметров телескопов. Обозначения телескопов соответствуют табл. 1. Функция вклада определялась по выражению [6]

$$(7) \quad F_k = 1 - \frac{\sigma_k^2}{\sigma_0^2} = 1 - \frac{\sigma^2(h_0 - h_k)}{\sigma_0^2},$$

где индексы k соответствуют обозначениям на рис. 2 и значениям k для σ_k табл. 1.

Из рис. 2 можно сделать вывод, что самый большой вклад в полную ошибку поверхности оптики телескопа вносит локальная ошибка, а самый малый — радиальная (зональная) составляющая полной ошибки. Средние значения вкладов (в %) распределяются по ошибкам следующим образом: локальная ошибка 52, кома 28, астигматизм 17, зональная ошибка 3.

Выполненный нами анализ позволяет сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Основным типом ошибок крупных телескопов являются локальные ошибки.

Дальнейшее улучшение качества оптики крупных телескопов возможно только на пути автоматизации локальной регулировки.

Методы контроля оптики телескопов должны давать сведения о всей поверхности без предположения о радиальной симметрии ошибок. Например, методы, дающие только одну проекцию aberrаций зеркала: метод щели и нити; теневые одномерные методы, дающие профиль вдоль одного сечения детали, и другие, использующие одномерность или радиальную симметрию, должны быть исключены. В частности, классическая постоянная Гартмана, рассчитываемая по парам измеряемых точек, не несет никакой информации о качестве оптики. Кроме того, представление поверхности полиномами Цернике, даже с использованием полиномов с очень

высокими степенями, может быть методически неверным в случае зеркал с изолированными локальными ошибками, особенно если они имеют большую пространственную частоту.

2. Зональная составляющая ошибок в среднем дает всего 3% от полной ошибки. В абсолютной мере эта величина $\bar{\sigma}_r = 0,026$ мкм, что очень близко к значению предела Марешаля для зеркал, который равен $1/28$ длины волны, что составляет $\sim 0,02$ мкм для длины волны $0,55$ мкм по величине среднеквадратического отклонения. Поэтому величину $\bar{\sigma}_r$, близкую пределу Марешаля $\bar{\sigma}_M$, можно принять за предел возможностей современной оптической технологии при условии, что оптик-изготовитель имеет средства для локальной ретуши.

3. Основываясь на критерии Марешаля $\sigma_M = 0,02$ мкм и на возможностях реальной оптической технологии, отметим, что лучшее зеркало СТ10 по полной ошибке в 2 раза хуже теоретического предела, зеркало Ликской обсерватории — в 4,3 раза, а превосходный объектив БСВТ в 1,4 раза хуже возможностей, уже достигнутых технологией, устраняющей зональные ошибки.

4. Ни для одного из типов ошибок не выявлено явной зависимости от диаметра главного зеркала. Это противоречит интуитивному представлению о том, что большие оптические поверхности сложнее в изготовлении, чем малые. Следует, однако, отметить, что трудоемкость изготовления зеркала наряду с этим растет примерно как D^3 , где D — диаметр зеркала.

5. Следующие за локальной ошибкой дефекты: кома и астигматизм. Для ряда зеркал (22%) астигматизм больше комы, в других случаях, наоборот, кома больше астигматизма.

6. Для компенсации ошибок оптики средствами адаптивной техники необходимо использовать не модальную, а локальную коррекцию. Рабочий диапазон приводов адаптивного оптического элемента можно принять $6\bar{\sigma}_0 = 1$ мкм, а пространственная частота их расположения будет однозначно определяться после анализа конкретной оптической поверхности по пространственной частоте ошибок этой оптической поверхности.

Следует заметить, что если проводится компенсация воздействия атмосферных искажений адаптивной техникой без компенсации ошибок оптики телескопа, то такая компенсация эффективна лишь до предела, который задается величиной локальных ошибок и главных мод искажений — комой и астигматизмом, вносимых оптикой телескопа.

Институт космических исследований
Академии наук СССР, Москва
Институт оптики атмосферы
Сибирского отделения Академии наук СССР, Томск
Специальное конструкторское бюро
научного приборостроения "Оптика"
Сибирского отделения Академии наук СССР, Томск

Поступило
26 XI 1986

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова Л.И., Витриченко Э.А., Коняев П.А., Пушной Л.А. Математическое обеспечение контроля качества изображения оптических систем. М., 1983. 73 с. (Препринт. Ин-т космич. исслед. АН СССР, № 838).
2. Витриченко Э.А. Астроклимат и эффективность телескопов. Л.: Наука, 1984, с. 10–17.
3. Гершберг Р.Е., Лиморенко К.Я., Проник В.И. — Изв. Крымск. астрофиз. обсерв., 1983, т. 67, с. 132–158.
4. Домышев Г.Н., Клевцов Ю.А., Скоморовский В.И. и др. В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца. М.: Наука, 1982, вып. 60, с. 212–213.
5. Михельсон Н.Н. — Опт.-мех. пром-сть, 1976, № 7, с. 62–65.
6. ОСТ 3–5476–83. Объективы. Классификация ошибок волнового фронта и погрешностей изготовления оптических деталей. Введен впервые. Введ. 1983. 12 с. Группа 091. СССР.
7. Снежко Л.И. — Письма в Астрон. журн., 1980, т. 6, с. 667–670.
8. Franza F., Le Luyer M., Wilson R.N. — ESO Techn. Rep., 1977, № 8.
9. Ghozeil Z., Simmons J.E. — Appl. Opt., 1974, vol. 13, № 8, p. 1773–1777.
10. Mayall N.U., Vasilevskis S. — Astron. J., 1960, vol. 65, p. 304–317.