

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ПЯТНЕ РАССЕЙЯНИЯ С ВЕЛИЧИНОЙ И ФОРМОЙ ОТСТУПЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА ОТ ИДЕАЛЬНОЙ

Канд. наук В. А. ЗВЕРЕВ, канд. наук С. А. РОДИОНОВ, канд. наук М. Н. СОКОЛЬСКИЙ, Л.М. ЛАПО

Показана зависимость распределения энергии в пятне рассеяния астрономических зеркал от величины среднеквадратической деформации волнового фронта. Рассмотрены различные типы отступлений поверхности зеркала от идеальной. Даны рекомендации для определения точности изготовления крупногабаритных зеркал.

При изготовлении крупногабаритных астрономических зеркал одной из проблем является оценка допустимых величин остаточных отступлений поверхности зеркала от идеального параболоида вращения. Часто применяемый критерий Релея, допускающий остаточную волновую абберацию в пределах четверти длины волны света, соответствует деформации поверхности зеркала около 0,07 мкм при $\lambda = 0,546$ мкм.

Как известно [1], критерий Релея – частный случай маршалевского критерия, требующего, чтобы среднеквадратическая деформация волнового фронта относительно ближайшей сферы не превышала $\lambda/14$. В этом случае, как показал Маршалль, освещенность в центре дифракционного пятна рассеяния будет не менее 80% соответствующей освещенности в идеальной системе. При некоторых типах аббераций, например при расфокусировке, сферической абберации третьего порядка, среднеквадратическая деформация, равная $\lambda/14$, приводит к максимальному отклонению волнового фронта от сферы сравнения в пределах критерия Релея. Только для подобных случаев справедливо известное положение о том, что система, удовлетворяющая критерию Релея, практически не отличается от идеальной.

В работах [2, 3] показано, что соблюдение критерия Релея далеко не всегда гарантирует получение практически идеальной системы. В [2] рассматривается быстро меняющаяся по знаку волновая абберация, удовлетворяющая критерию Релея, а именно $W(x) = \lambda/8P_{20}$, где P_{20} – полином Лежандра, x – координата на зрачке. Видно, что введение такой абберации весьма существенно ухудшает частотно-контрастную характеристику (более чем на 50%) и приводит к снижению до 70% освещенности в центре пятна рассеяния. В [3] исследован волновой фронт весьма сложной формы применительно к конкретному образцу оптической системы. Показано, что относительная освещенность в центре пятна рассеяния (число Штреля), равная 0,8, обусловлена максимальной деформацией волнового фронта, равной не $\lambda/4$ при данной его конфигурации, как по критерию Релея, а $\lambda/10$; деформация же $\lambda/4$ дает число Штреля, равное 0,5.

Большие астрономические зеркала эксплуатируются в условиях, при которых влияние атмосферы на качество изображения [4] приводит к падению освещенности в центре пятна рассеяния изображения точки более чем на 20%,

поэтому оценка качества изображения, даваемого зеркалом при его изготовлении, по критерию Релея становится весьма условной.

В практике астрономического приборостроения качество изображения телескопа, как правило, характеризуется распределением энергии в пятне рассеяния изображения точечного объекта. Следовательно, для определения допустимых величин остаточных деформаций необходимо связать указанную оценку качества изображения с характером деформации волнового фронта. Поскольку в явном виде эта зависимость достаточно просто не выражается, авторами был проведен расчет распределения энергии при различных величинах и типах деформации волнового фронта систем, обладающих круговой симметрией. Последнее условие значительно упрощает вычисления и интерпретацию результатов. Влияние асимметрии деформации из-за местных искажений весьма незначительно [5]. Можно ожидать, что на концентрацию энергии влияет не столько конкретная форма деформации, сколько ее величина, площадь, занимаемая ею, и пространственная частота деформации.

Как известно, распределение освещенности в дифракционном пятне рассеяния у систем, обладающих круговой симметрией, есть квадрат модуля ганкелевского образа нулевого порядка от функции зрачка $f(\rho)$ [6]:

$$h(r) = \left| 2\pi \int_0^1 f(\rho) J_0(2\pi\rho r) \rho dr \right|^2,$$

где J_0 – функция Бесселя 1 рода нулевого порядка, ρ, r – канонические координаты на зрачке и в плоскости изображения: $\rho = \frac{\bar{\rho}}{A_0}, r = \frac{\bar{r}}{\lambda} A_0$ (A_0 – апертура, λ – длина волны, $\bar{\rho}$ и \bar{r} – действительные координаты). Если \bar{r} выразить в угловых единицах, например в секундах, то апертура будет линейной величиной, равной половине диаметра зеркала. В этом случае при $\lambda = 0,546$ мкм

$$r = \frac{\bar{r}D}{218}.$$

Здесь D – диаметр зеркала в мм.

Распределение энергии в пятне рассеяния есть первообразная от $h(r)$:

$$E(r) = \int_0^r h(r) dr.$$

Функция зрачка имеет вид

$$f(\rho) = \begin{cases} e^{2\pi iW(\rho)} & \text{при } \rho \leq 1 \\ 0 & \text{при } \rho > 1 \end{cases}$$

где $W(\rho)$ – волновая абберация в длинах волн.

Функция волновой абберации задавалась коэффициентами разложения по полиномам Цернике [7]:

$$W(\rho) = \sum_{k=1}^n a_k R_{2(k+1)}^0(\rho)$$

При этом благодаря ортогональности полиномов Цернике легко определить среднеквадратическую деформацию волнового фронта

$$\Delta \bar{W} = \sqrt{\sum \frac{a_k^2}{2k+3}}$$

На рис. 1 приведены графики волновых aberrаций различных характерных типов и соответствующие им графики распределения энергии в пятне рассеяния.

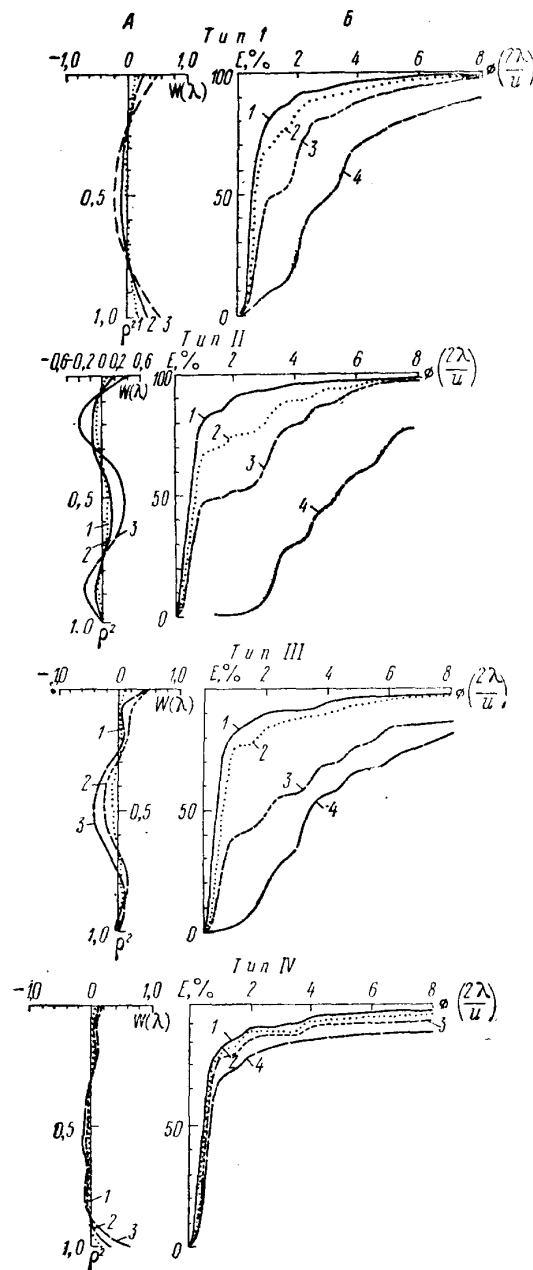


Рис. 1: А – зависимость волновой aberrации W от квадрата относительного радиуса на зрачке ρ^2 ; Б – распределение энергии в пятне рассеяния при различных отступлениях форм поверхности от идеальной: 1 – идеальная система ($W=0$), 2÷5 при различных W по рис. 1,а.

В таблице даны значения максимальной волновой аберрации ΔW_{\max} («размах»), среднеквадратической волновой аберрации $\overline{\Delta W}$ и соответствующие им значения угловых диаметров кружков (при $D=6000$ мм), в которых концентрируется 50, 84, 90 и 98% энергии.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Распределение энергии обусловлено не столько максимальной величиной деформации ΔW_{\max} , сколько среднеквадратической деформацией $\overline{\Delta W}$. Так, например, при разных типах деформаций размеры кружков, содержащие 50 и 80% энергии, примерно одинаковы при равных величинах $\overline{\Delta W}$, а максимальные деформации ΔW_{\max} при этом отличаются весьма существенно. Если в кружке сосредоточено 98% энергии, то этого соответствия не наблюдается, что свидетельствует о более сильной его зависимости от формы деформации и, как отмечалось, о гораздо меньшей точности определения размера кружка.

		Система без абerr.	Тип I			Тип II			Тип III			Тип IV			
ΔW_{\max}		0	0,19	0,38	0,75	0,22	0,36	0,62	0,84	0,21	0,64	0,84	0,23	0,35	0,76
$\overline{\Delta W}$		0	0,06	0,11	0,22	0,07	0,12	0,20	0,28	0,05	0,16	0,25	0,03	0,40	0,10
E, %	50	0,02"	0,02"	0,04"	0,11"	0,02"	0,06"	0,16"	0,20"	0,02"	0,07"	0,10"	0,02"	0,02"	0,02"
	84	0,05"	0,07"	0,12"	0,24"	0,12"	0,17"	0,27"	0,37"	0,07"	0,07"	0,21"	0,33"	0,06"	0,12"
	90	0,07"	0,06"	0,11"	0,32"	0,16"	0,21"	0,36"	0,41"	0,14"	0,24"	0,40"	0,10"	0,12"	0,36"
	98	0,37"	0,47"	0,53"	0,72"	0,48"	0,55"	0,75"	0,84"	0,47"	0,60"	0,92"	0,66"	0,86"	3,20"

Значение диаметра кружка рассеяния в зависимости от максимальной ΔW_{\max} и среднеквадратической $\overline{\Delta W}$ волновой аберрации при разных типах волнового фронта

2. Соблюдение критерия Релея не гарантирует получения пятна рассеяния, по распределению энергии близкого (отличие не превышает 20%) к идеальному. Например, у системы, характеризуемой кривой II (рис. 1,а), при максимальной деформации $0,22\lambda < \lambda/4$ и ее среднеквадратическом значении $0,07\lambda < \lambda/14$ диаметр пятна рассеяния, содержащего 84% энергии, в 2,6 раза больше, чем у идеальной системы. У системы, представленной кривой I (рис. 1,а), это отличие составляет 1,6 раза. В то же время при 50%-ном уровне энергии указанное отличие менее заметно: для кривой типа II оно равно 1,3 раза, для кривой типа I – 1,2 раза. Таким образом, аберрации прежде всего сказываются на расширении «основания» ореола пятна рассеяния, а не его центрального ядра, причем это их влияние возрастает с усложнением формы волнового фронта, что хорошо видно на рис. 2.

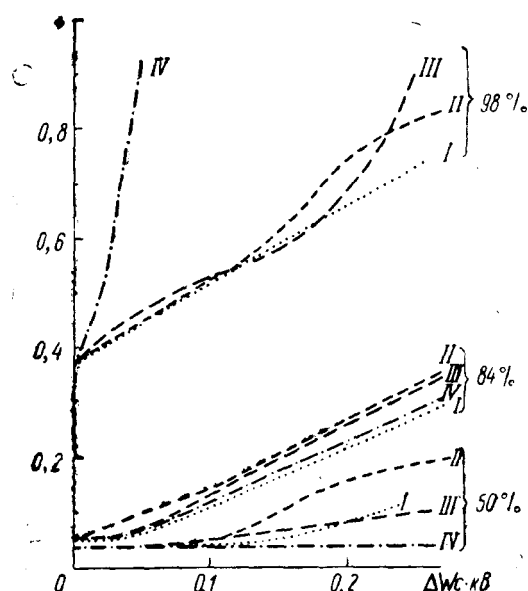


Рис. 2. Зависимость диаметра кружка рассеяния, содержащего 50, 84 и 98% энергии, от ΔW при разных типах деформаций ($D=6000$ мм)

3. Полученные результаты нетрудно использовать для оценки допустимых величин деформаций зеркал любого размера. Для этого необходимо изменить масштаб по оси r на графиках и в таблицах. Отсюда можно сделать принципиально важный вывод о том, что чем меньше зеркало, тем жестче допуск на остаточные деформации поверхности при прочих равных условиях и при тех же угловых размерах кружков.

4. Из рис. 2 видно, что «плавные» деформации (типа I) приводят к увеличению центрального ядра (50%) пятна рассеяния, в то время как деформации с резкими изменениями (типа IV) вызывают увеличение ореола.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марешаль А., Франсон М. *Структура оптического изображения*. «Мир», 1964.
2. Barakat R.— JOSA, 1965, vol. 55, № 5, p. 572.
3. Tshunko H.—“Appl. Opt.”, 1971. vol. 10. № 11, p. 2423.
4. Hufnagel, Stonley—JOSA, 1964, vol. 54, p. 1.
5. Зверев В.А., Родионов С.А., Сокольский М.Н. — «*Опт. и спектр.*», 1974, т. XXXVI, вып. 4.
6. Папулис А. *Теория систем и преобразований в оптике*. «Мир», 1971.
7. Борн М., Вольф Е. *Основы оптики*. «Наука», 1970.