

Методика измерения параметров вогнутых крупногабаритных асферических зеркал с помощью датчика волнового фронта

© Т.С. Пискунов, Н.В. Барышников, И.В. Животовский, А.А. Сахаров, В.А. Соколовский

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия

e-mail: piskunov_t@bmstu.ru

Поступила в редакцию 30.05.2019 г.

В окончательной редакции 30.05.2019 г.

Принята к публикации 04.06.2019 г.

Разработана методика измерения радиуса R_v и эксцентриситета (параметра *conic k*) вогнутых крупногабаритных асферических зеркал с помощью датчика волнового фронта. Получены аналитические выражения, напрямую связывающие коэффициенты Цернике a_4 и a_9 с параметрами зеркала R_v и k . Показано, что методика не требует точной юстировки зеркала перед измерениями. Проведенный компьютерный анализ показал, что разработанная схема позволяет осуществлять измерения с погрешностями $\delta R_v < 0.1\%$ и $\delta k < 0.01$ для зеркал с радиусами от 100 до 2000 mm, $\delta R_v < 0.01\%$ и $\delta k < 0.001$ для зеркал с радиусами более 5000 mm.

Ключевые слова: асферическая поверхность, асферическое зеркало, метрология, датчик Шака–Гартмана, датчик волнового фронта, радиус кривизны, эксцентриситет, параметр *conic*, погрешности измерений, Zemax.

DOI: 10.21883/OS.2019.10.48362.167-19

1. Введение

Контроль формы и измерение параметров вогнутых крупногабаритных асферических зеркал является одной из важнейших метрологических задач при производстве оптики [1,2]. Такие зеркала могут использоваться в качестве рефлекторов в оптических телескопах и в различных лазерных системах. В качестве измеряемых параметров выступают радиус вершинной сферы R_v и эксцентриситет (или параметр *conic k*). Требования к погрешности измерений этих параметров могут составлять δR_v от 0.1% до 0.01% от измеряемого радиуса R_v , а δk от 0.01 до 0.001 [3–6].

Существуют различные методы измерения параметров таких зеркал. Например, методы, основанные на интерферометрах Физо и Тваймана–Грина [7,8], метод оценки волнового фронта с помощью диафрагм [9], методы измерения профиля поверхности зеркала [10,11] и методы оценки волнового фронта с использованием датчика Шака–Гартмана [12,13]. Разработанный авторами метод в [1,13], заключающийся в регистрации профиля волнового фронта, отраженного от поверхности исследуемого зеркала, позволяет проводить измерения радиуса кривизны R_v с высокой точностью [14]. Однако этот метод не позволяет осуществлять измерение параметра *conic*, а его практическая реализация показывает, что результаты измерений сильно искажаются вследствие прохождения волнового фронта через коллимирующий объектив в прямом и обратном ходе.

Для решения обозначенных проблем необходимо модифицировать оптическую схему регистрации волново-

го фронта таким образом, чтобы волновой фронт от источника попадал на зеркало, не проходя дополнительных оптических элементов. В такой схеме датчик Шака–Гартмана будет сравнивать волновой фронт, отраженный от поверхности исследуемого зеркала, с идеальным сферическим волновым фронтом. Раскладывая разницу этих волновых фронтов на полиномы Цернике, можно рассчитать радиус вершинной сферы R_v и параметр *conic k*. В этой работе приведены аналитические зависимости R_v и k от коэффициентов Цернике, а также теоретический анализ погрешностей при проведении измерений предложенной методикой. В отличие от интерферометрических методов датчик волнового фронта Шака–Гартмана не требует постоянного использования в схеме эталонной поверхности: эталонный волновой фронт записывается датчиком один раз во время калибровки [13].

2. Теория

2.1. Схема и методика измерений

На рис. 1 показана оптическая схема установки для измерения радиуса кривизны и эксцентриситета (или параметра *conic*) вогнутого зеркала. Излучение в виде сферического волнового фронта, отражаясь от светоделительной поверхности, направляется на исследуемое зеркало. Отраженный от зеркала волновой фронт регистрируется датчиком волнового фронта. Точечный источник излучения и фокус объектива устанавливаются на одинаковом расстоянии от светоделительной

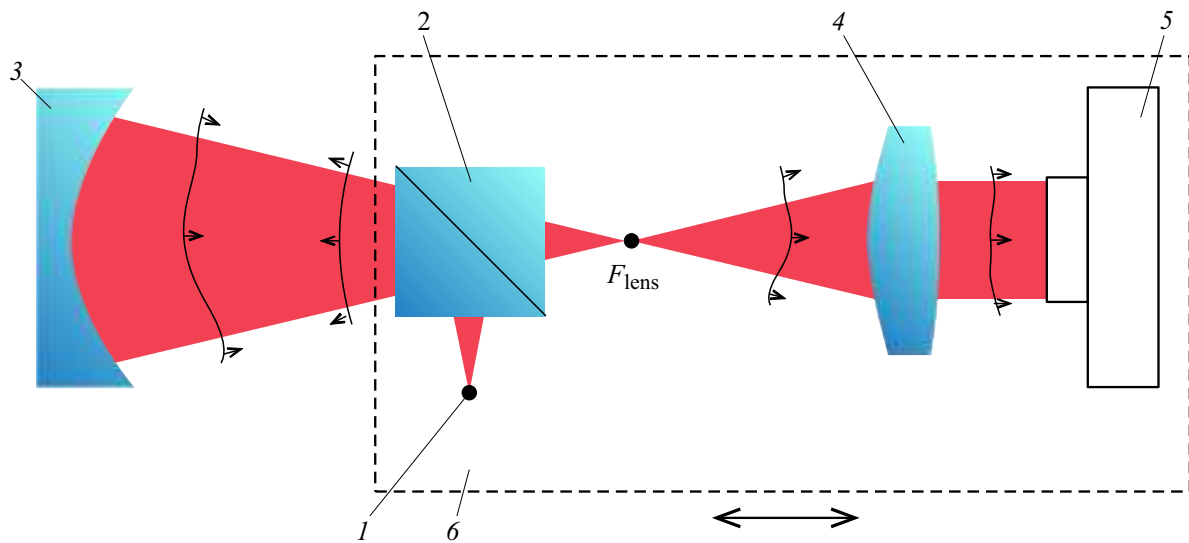


Рис. 1. Оптическая схема установки для измерения радиуса кривизны и эксцентриситета вогнутого зеркала. 1 — излучатель, 2 — светоделитель, 3 — исследуемое зеркало, 4 — объектив, 5 — датчик волнового фронта, 6 — подвижная платформа.

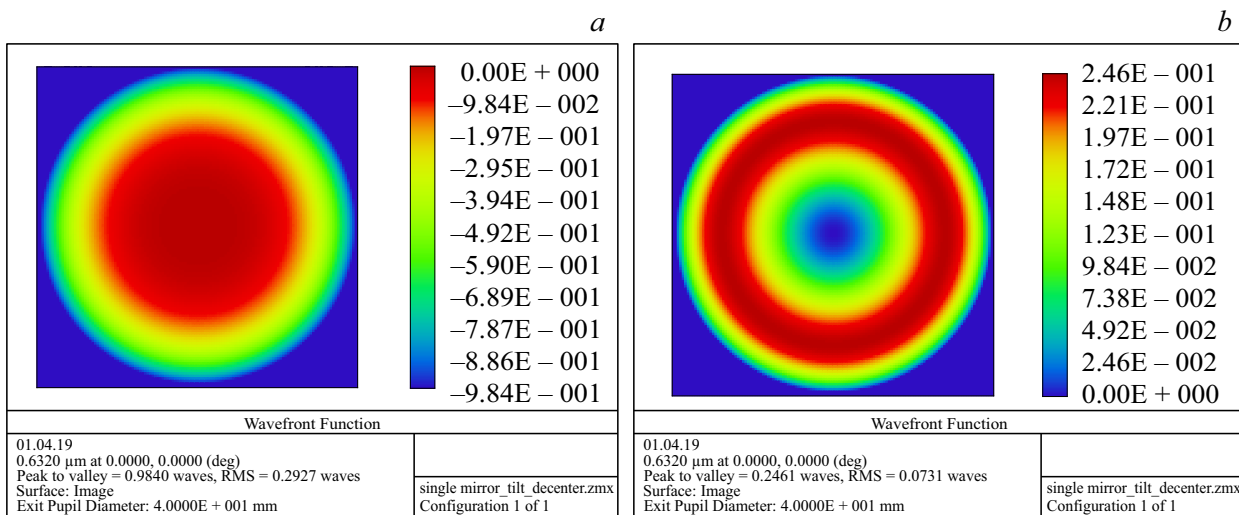


Рис. 2. Пример волновых фронтов, регистрируемых датчиком (результат компьютерного моделирования). (a) Центр радиуса кривизны вершинной сферы асферического зеркала совпадает с F_{lens} . (b) Зеркало установлено так, чтобы коэффициент Цернике $a_4 = 0$.

поверхности. Все элементы схемы устанавливаются на подвижной платформе, что позволяет менять расстояние между исследуемым зеркалом и фокусом объектива датчика F_{lens} .

Если в качестве исследуемого зеркала установлено сферическое зеркало и центр его радиуса кривизны совпадает с фокусом объектива, датчик зарегистрирует плоский волновой фронт. В случае идеальной юстировки все коэффициенты Цернике будут равны нулю. Если установить асферическое зеркало, например параболическое (параметр *conic* которого равен -1), то зарегистрированный волновой фронт будет иметь вид, показанный на рис. 2, a. При этом будут ненулевыми следующие коэффициенты Цернике: a_1 (*piston*), a_4 (*defocus*),

a_9 (*primary spherical*)¹. Коэффициенты более высоких порядков в рамках данной методики можно считать пренебрежимо малыми. Перемещая подвижную платформу вдоль оптической оси на расстояние Δ можно добиться того, что $a_4 = 0$, т.е. компенсировать дефокусировку. На рис. 2, b показан волновой фронт, полученный в результате этого. При этом коэффициенты a_1 и a_9 останутся ненулевыми. Очевидно, что величины перечисленных коэффициентов будут зависеть от радиуса вершинной сферы R_v , параметра *conic* k и светового диаметра D зеркала.

¹ Здесь и далее в работе используется нумерация коэффициентов в соответствии с принятыми в ПО Zemax „Zernike Fringe Coefficients“ [15].

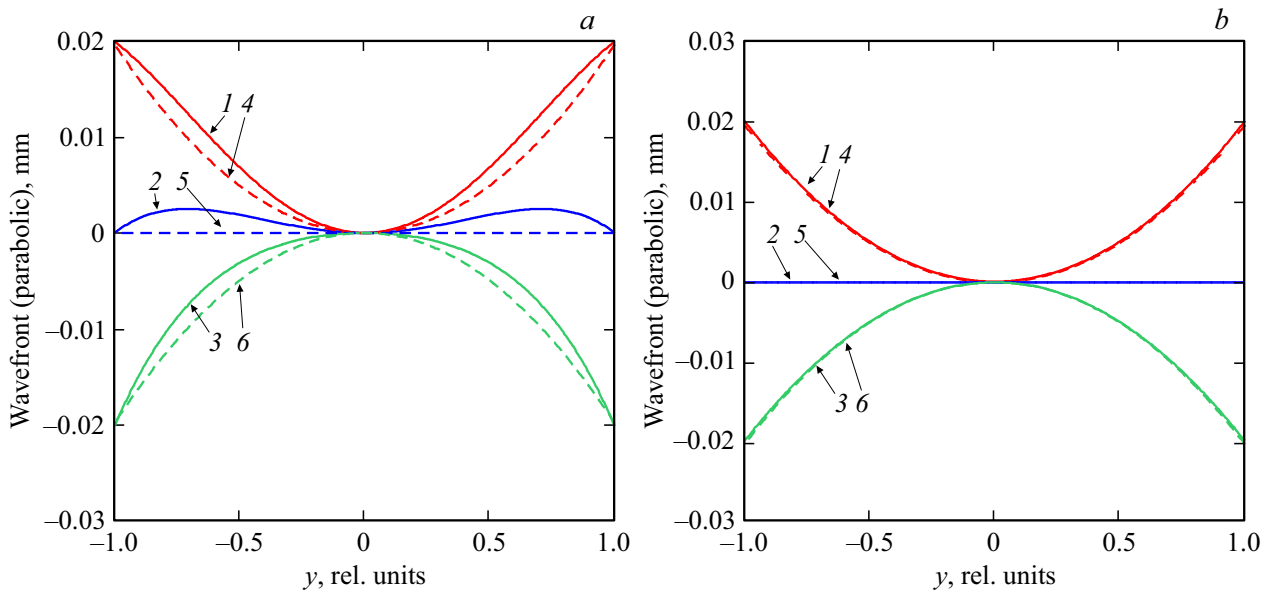


Рис. 3. Сравнение волновых фронтов, измеренных датчиком, с соответствующими полиномами Цернике Z_4 . Кривые полиномов смещены по оси ординат так, чтобы $Z_4(0) = 0$. (а) Параболическая поверхность: 1 — $wf_1(y, k = -1, l_{sph} = R_{cl} + 2)$, 2 — $wf_1(y, k = -1, l_{sph} = R_{cl})$, 3 — $wf_1(y, k = -1, l_{sph} = R_{cl} - 2)$, 4 — $Z_4(y, k = -1, l_{sph} = R_{cl} + 2)$, 5 — $Z_4(y, k = -1, l_{sph} = R_{cl})$, 6 — $Z_4(y, k = -1, l_{sph} = R_{cl} - 2)$. (б) Сферическая поверхность: 1 — $wf_1(y, k = 0, l_{sph} = R_v + 2)$, 2 — $wf_1(y, k = 0, l_{sph} = R_v)$, 3 — $wf_1(y, k = 0, l_{sph} = R_v - 2)$, 4 — $Z_4(y, k = -1, l_{sph} = R_{cl} + 2)$, 5 — $Z_4(y, k = -1, l_{sph} = R_{cl})$, 6 — $Z_4(y, k = -1, l_{sph} = R_{cl} - 2)$.

Таким образом, описанная схема позволяет измерить величины коэффициентов Цернике a_4 и a_9 , которые можно однозначно связать аналитическими выражениями с параметрами зеркала R_v и k .

2.2. Аналитические зависимости

Запишем уравнение поперечного сечения асферической поверхности плоскостью YOZ в следующем виде [15]:

$$z(y, k, R) = \frac{y^2}{(R + \sqrt{R^2 - (1+k)y^2})}, \tag{1}$$

где z — координата вдоль оптической оси OZ, y — координата по оси OY, R — это радиус кривизны поверхности, а k — параметр conic.

Согласно схеме измерений, приведенной на рис. 1, датчик волнового фронта проводит сравнение волнового фронта, отразившегося от исследуемой поверхности с идеальным сферическим волновым фронтом, который бы отразился от сферического зеркала с радиусом кривизны, равным расстоянию от фокуса F_{lens} объектива до вершины зеркальной поверхности — l_{sph} . Таким образом, поперечное сечение результирующей функции можно представить в виде разницы профилей поверхностей асферического и сферического зеркал:

$$wf_1(y, k, l_{sph}) = 2 \left(z \left(\frac{D}{2}y, k, R_v \right) - z \left(\frac{D}{2}y, 0, l_{sph} \right) \right). \tag{2}$$

Сравним графически эту функцию с полиномом Цернике Z_4 [15]:

$$Z_4(y, k, l_{sph}) = a_4(k, l_{sph}) (2y^2 - 1). \tag{3}$$

На рис. 3, а показаны функции (2) и (3) для параболического зеркала с $R_v = 400$ mm, $k = -1$ и $D = 80$ mm. Коэффициенты a_4 соответствуют полученным в Zemax коэффициентам при моделировании схемы с отнесением зеркала на соответствующие расстояния l_{sph} . Необходимо обратить внимание на то, что зеркало смещалось относительно нулевого положения: коэффициент $a_4 = 0$ при $l_{sph} = R_{cl}$, где R_{cl} — это радиус ближайшей сферы, который можно рассчитать по известной формуле [16]:

$$R_{cl} = R_v - \frac{kD^2}{16R_v}. \tag{4}$$

Сравним теперь полученные графики функций Z_4 со сферической поверхностью, т.е. подставим в (2) $k = 0$ и будем осуществлять перемещения относительно нового нулевого положения $l_{sph} = R_v$. Результат расчета показан на рис. 3, б. Видно, что кривые, полученные при смещении сферической поверхности, с высокой степенью точности совпадают с кривыми Z_4 , коэффициенты которых были получены при смещении параболической поверхности.

На основании приведенных примеров можно предположить, что справедливо следующее уравнение:

$$wf_1(y = 1, k = 0, l_{sph} = R_v + \Delta) = Z_4(y = 1, k = 0, l_{sph} = R_v + \Delta) + a_4. \tag{5}$$

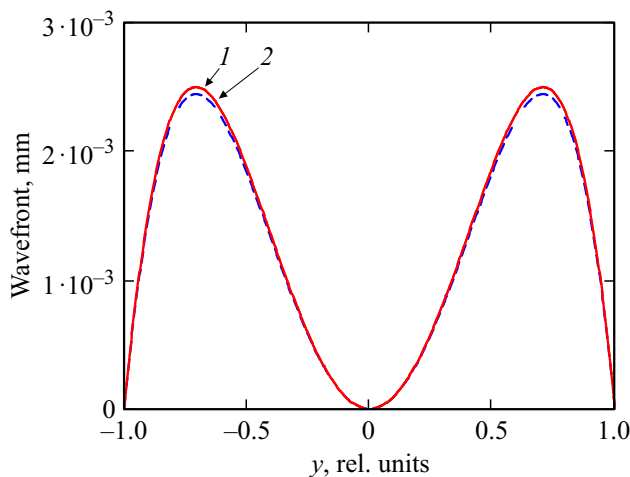


Рис. 4. Сравнение волнового фронта, измеренного датчиком, с соответствующим полиномом Цернике Z_9 . Кривая полинома смещена по оси ординат так, чтобы $Z_9(0) = 0$. 1 — $wf_2(y, k = -1, R_v)$, 2 — $Z_9(y, k = -1, R_{cl})$.

Подставив (2),(3) в (5), получим

$$z\left(\frac{D}{2}, 0, R_v\right) - z\left(\frac{D}{2}, 0, R_v + \Delta\right) = a_4. \quad (6)$$

Решая уравнение (6) относительно R_v , получим искомую зависимость

$$R_v(a_4, \Delta, D) = \frac{1}{2} \left[-\Delta \pm (\Delta + a_4) \sqrt{\frac{a_4^2 + 2\Delta a_4 + D^2}{a_4^2 + 2\Delta a_4}} \right], \quad (7)$$

где знак „+“ перед радикалом должен использоваться в случае $\Delta > 0$, а знак „-“ в случае $\Delta < 0$.

Таким образом, для измерения радиуса кривизны R_v асферической поверхности достаточно установить ее по схеме, приведенной на рис. 1, и добиться равенства нулю коэффициента a_4 . После этого необходимо сместить подвижную платформу на небольшое расстояние Δ (например, в пределах $\pm 10 \text{ mm}$)², измерить значение коэффициент a_4 и подставить измеренные величины в (7). Важно, что выражение (7) позволяет определить радиус R_v , не имея информации о параметре *conic k* зеркала.

Для измерения параметра *conic k* рассмотрим волновой фронт, при котором $a_4 = 0$:

$$wf_2(y, k, R_v) = 2 \left(z\left(\frac{D}{2}, y, k, R_v\right) - z\left(\frac{D}{2}, y, 0, R_{cl}\right) \right). \quad (8)$$

Сравним графически эту функцию с полиномом Цернике Z_9 [15]:

$$Z_9(y, k, R_{cl}) = a_9(k, R_{cl})(6y^4 - 6y^2 + 1). \quad (9)$$

На рис. 4 показаны функции (8) и (9) для параболического зеркала с $R_v = 400 \text{ mm}$, $k = -1$ и $D = 80 \text{ mm}$.

² Эта величина зависит от параметров подвижной платформы.

Коэффициент a_9 соответствует полученному в Zemax коэффициенту при моделировании схемы с отнесением зеркала на соответствующее расстояние R_{cl} . На основании приведенного примера можно предположить, что справедливо следующее уравнение³:

$$wf_2(y, k, R_v) = Z_9(y, k, R_{cl}) - a_9. \quad (10)$$

Подставив (4) и (8), (9) в (10), получим

$$\begin{aligned} z\left(\frac{D}{2}, y, k, R_v\right) - z\left(\frac{D}{2}, y, 0, R_v - \frac{kD^2}{16R_v}\right) \\ = a_9(6y^4 - 6y^2). \end{aligned} \quad (11)$$

Решая уравнение (11) относительно k , в окрестностях точки $y = 0$, получим искомую зависимость

$$k(a_9, R_v, D) = \frac{384a_9R_v^3}{D^4 + 24a_9R_vD^2}. \quad (12)$$

Таким образом, для измерения параметра *conic* асферической поверхности достаточно установить ее по схеме, приведенной на рис. 1 и добиться равенства нулю коэффициента a_4 . После этого необходимо измерить значение коэффициента a_9 и подставить измеренные величины в (12).

2.3. Погрешности методики измерений

Очевидно, что погрешность подобных измерений зависит от погрешностей параметров, входящих в расчетные формулы (7) и (12). Эту методическую погрешность легко вычислить по известной формуле:

$$\begin{aligned} \delta R_v &= \sqrt{\left(\frac{\partial R_v}{\partial a_4} \delta a_4\right)^2 + \left(\frac{\partial R_v}{\partial \Delta} \delta \Delta\right)^2 + \left(\frac{\partial R_v}{\partial D} \delta D\right)^2}; \\ \delta k &= \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial a_9} \delta a_9\right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial R_v} \delta R_v\right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial D} \delta D\right)^2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\delta a_4 \dots \delta D$ — погрешности измерения соответствующих величин.

Подставив (7) и (12) в (13) и упростив выражения, отбросив члены третьего порядка малости, получим выражения

$$\begin{aligned} \delta R_v &= \sqrt{\left(\frac{\delta a_4}{2} \frac{D\Delta^2}{(a_4^2 + 2a_4\Delta)^{3/2}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta}{2} \left[\frac{\Delta D}{\sqrt{a_4(a_4 + 2\Delta)(a_4 + 2\Delta)}} + 1\right]\right)^2 + \left(\frac{\delta D}{2} \frac{a_4 + \Delta}{\sqrt{a_4^2 + 2a_4\Delta}}\right)^2}; \\ \delta k &= \sqrt{\left(\delta a_9 \frac{384R_v^3}{D^4}\right)^2 + \left(\delta R_v \frac{1152R_v^2 a_9}{D^4}\right)^2 + \left(\delta D \frac{1536R_v^3 a_9}{D^5}\right)^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

³ Видно, что кривые на графике различаются, однако эта разница не превышает десятков нанометров, что находится в пределах погрешностей датчиков волнового фронта.

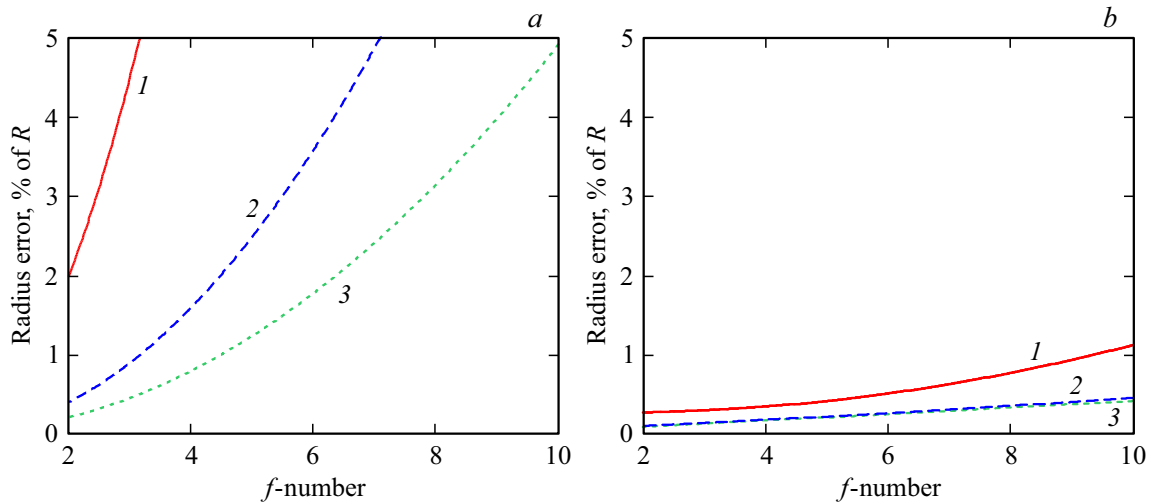


Рис. 5. Зависимость погрешности δR_v от диафрагменного числа f'/D . Приведены графики для $R_v = 500$ mm. Характер зависимости остается примерно одинаковым для радиусов в пределах от 100 до 2000 mm. $\Delta = -1$ mm (1), -5 mm (2), -10 mm (3). (a) Точность $\delta a_4 = \lambda/2$. (b) Точность $\delta a_4 = \lambda/100$.

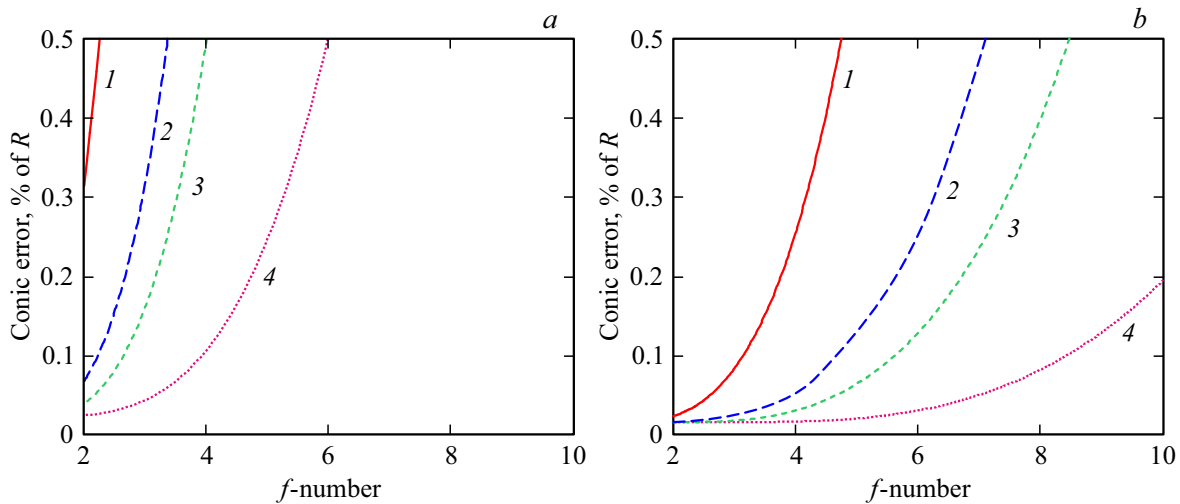


Рис. 6. Зависимость погрешности δk от диафрагменного числа f'/D . Приведены графики для $\delta R_v = 0.5\%$. $\delta a_9 = \lambda/2$ (1), $\lambda/10$ (2), $\lambda/20$ (3), $\lambda/100$ (4). (a) $R_v = 100$ mm. (b) $R_v = 2000$ mm.

Полученные выражения позволяют определить погрешность проводимых измерений в зависимости от точности конкретной аппаратуры и величины измеряемых параметров.

Проанализируем величины погрешностей измерений для вогнутых асферических зеркал. Как правило, требуется измерять радиусы зеркал R_v в пределах от 100 до 2000 mm и более, при этом диафрагменное число f'/D у таких зеркал лежит в пределах от 2 до 10 [3–6]. Погрешность $\delta \Delta$ — это погрешность перемещения подвижной платформы, которую для данного примера можно считать равной $5 \mu\text{m}$ [17]. Как было сказано ранее, для измерения радиуса кривизны зеркала достаточно перемещать платформу на расстояния менее 10 mm (перемещения $\Delta > 0$ или $\Delta < 0$ влияют на погрешность измерений одинаково, поэтому для дан-

ного примера будем использовать $\Delta < 0$). Погрешность диаметра δD может быть минимизирована установкой точной диафрагмы, одинаково ограничивающей пучок лучей при любых перемещениях платформы. Примем $\delta D = 0.1$ mm. Погрешности δa определяются точностью датчика волнового фронта. В литературе приводятся различные точности таких датчиков [18,19]. Для примера рассмотрим погрешности от $\lambda/2$ до $\lambda/100$.

На рис. 5 приведена зависимость погрешности δR_v от диафрагменного числа f'/D . Видно, что для обеспечения погрешности δR_v менее 0.1% от измеряемого радиуса R_v необходимо обеспечить большие диафрагменные числа от 2 до 4 и использовать датчики высокой точности $\lambda/100$.

На рис. 6 приведена зависимость погрешности δk от диафрагменного числа f'/D . Видно, что при больших

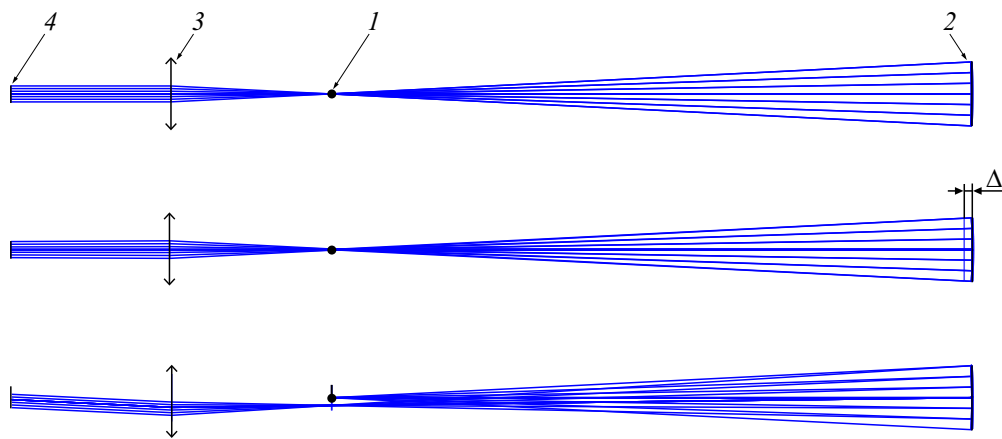


Рис. 7. Компьютерная модель оптической схемы. Вверху — съюстированная схема; в середине — вторая конфигурация; внизу — одна из реализаций разъюстировок зеркала. 1 — источник излучения, 2 — исследуемое зеркало, 3 — тонкая идеальная линза, 4 — плоскость анализа.

диафрагменных числах от 2 до 4 и точности датчика $\lambda/100$ погрешность δk составляет менее 001.

Таким образом, в работе показано, что коэффициенты Цернике a_4 и a_9 действительно можно однозначно связать аналитическими выражениями (7) и (12) с параметрами зеркала R_v и k , а разработанная схема позволяет осуществить измерения с погрешностями δR_v менее 0.1% и δk менее 0.01 для зеркал с радиусами от 100 до 2000 mm. Необходимо отметить, что подобный расчет для зеркал с радиусами более 5000 mm показывает, что погрешность δR_v будет менее 0.01%, а δk будет менее 0.001.

3. Устойчивость методики измерений

Описанная методика измерений предполагает идеальную юстировку оптической схемы. Для того, чтобы можно было использовать методику в реальных условиях, необходимо учесть, что измерения будут проводиться в схеме с децентрированным и наклоненным, в пределах некоторого допуска, зеркалом. Исследуем устойчивость описанной схемы измерений к разъюстировкам. Для этого создадим упрощенную компьютерную модель схемы, показанную на рис. 7.

В модели используется точечный источник излучения, расположенный на фиксированном расстоянии от датчика волнового фронта, представленного в виде тонкой идеальной линзы, положение фокальной плоскости которой совпадает с положением источника, и плоскости анализа. Необходимо отметить, что анализ производится в афокальном режиме, т.е. модель предполагает, что в плоскости анализа будет плоский волновой фронт.

Такая схема позволяет проводить анализ устойчивости к разъюстировкам с помощью инструмента „Tolerance Analysis“ в Zemax [15]. Операнды TEDX и TEDY позволяют моделировать случайные децентрировки измеряемого зеркала в пределах допуска, а операнды TETX и

TETY — случайные наклоны. В качестве компенсатора в этом анализе используется расстояние от источника излучения до зеркала, так как, как было описано ранее, в оптической схеме предполагается наличие высокоточной горизонтальной подвижки (рис. 1).

Для анализа влияния разъюстировок на погрешность измерения радиуса зеркала необходимо создать вторую конфигурацию схемы, в которой зеркало дополнительно смещено на некоторое расстояние Δ . Тогда анализ можно провести по следующему алгоритму, реализованному с помощью функции „Tolerancing — User Script“.

Zemax вносит случайные разъюстировки зеркала по методу Монте-Карло. После этого загружается целевая функция, оценивающая коэффициент a_4 в конфигурации с $\Delta = 0$, с помощью операнда ZERN 4. Проводится несколько циклов оптимизации компенсатора с целью минимизировать коэффициент a_4 . Этот процесс имитирует реальную юстировку измерительной системы в продольном направлении. В конце загружается вторая целевая функция, оценивающая отличие коэффициента a_4 , в конфигурации с дополнительным смещением Δ , от величины этого коэффициента в случае идеальной юстировки схемы (величина Δ не меняется в течение всего анализа). В результате этого анализа будет получено некоторое количество случайных реализаций допусков, позволяющее оценить, насколько сильно изменяется коэффициент a_4 .

Для анализа влияния разъюстировок на погрешность измерения параметра $conic$ необходимо воспользоваться следующим алгоритмом. После введения случайных разъюстировок загружается целевая функция, оценивающая коэффициент a_4 . При этом дополнительное смещение $\Delta = 0$ в течение всего анализа и вторая конфигурация, описанная выше, не используются. Проводится несколько циклов оптимизации компенсатора с целью минимизировать коэффициент a_4 . В конце загружается вторая целевая функция, оценивающая отличие коэффициента a_9 от величины этого коэффициента в

Результаты анализа устойчивости методики измерений

Анализ влияния разъюстировок на погрешность измерения радиуса зеркала

Допуск децентрировки зеркала	Допуск наклона зеркала	Изменение коэффициента a_4 , доли длины волны	
		Номинальное значение	
$\pm 0.5 \text{ mm}$	$\pm 0.5^\circ$	Номинальное значение	0
		Минимум	0.0002
		Максимум	0.0948
		СКО	0.0161
		10% реализаций имеют значение менее	0.0028
		50% реализаций имеют значение менее	0.0173
		90% реализаций имеют значение менее	0.0420

Анализ влияния разъюстировок на погрешность измерения параметра *conic k*

Допуск децентрировки зеркала	Допуск наклона зеркала	Изменение коэффициента a_9 , доли длины волны	
		Номинальное значение	
$\pm 0.5 \text{ mm}$	$\pm 0.5^\circ$	Номинальное значение	0
		Минимум	0
		Максимум	0.0009
		СКО	0.0001
		10% реализаций имеют значение менее	$4 \cdot 10^{-5}$
		50% реализаций имеют значение менее	0.0002
		90% реализаций имеют значение менее	0.0005

случае идеальной юстировки схемы с помощью операнда ZERN 9. В результате этого анализа будет также получено некоторое количество случайных реализаций допусков, позволяющее оценить, насколько сильно изменится коэффициент a_9 .

Приведенный алгоритм позволяет оценить, какую реальную погрешность измерений будут вносить допуски на юстировку оптической схемы. После такого анализа может быть принято решение об ужесточении/ослаблении допусков или о введении дополнительных механизмов юстировки.

4. Результаты компьютерного моделирования

Было проведено моделирование схемы с параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 200 mm и диафрагменным числом 5. Смещение $\Delta = 5 \text{ mm}$. Количество реализаций 100. Результаты моделирования приведены в таблице.

Видно, что разъюстировки в пределах приведенных допусков практически не влияют на изменение коэффициента a_9 и только 10% реализаций вносят значительную погрешность коэффициента a_4 , равную $\lambda/25$. При этом погрешности измерения составляют: δR_v менее 0.3% и δk менее 0.01. Необходимо отметить, что подобное моделирование для зеркал с радиусами более 5000 mm показывает, что погрешность δR_v будет менее 0.01%, а δk будет менее 0.001.

Приведенные допуски децентрировки $\pm 0.5 \text{ mm}$ и наклона $\pm 0.5^\circ$ являются свободными и могут быть с легкостью обеспечены в лабораторных условиях или в условиях оптического цеха с использованием доступного оборудования [20].

5. Обсуждение

В проведенном теоретическом исследовании учтены основные факторы, влияющие на погрешность измерений: погрешности датчика волнового фронта, механических подвижек и юстировки оптической схемы. Однако

следует заметить, что в реальной установке присутствуют дополнительные факторы, способные повлиять на погрешность [21].

В первую очередь, методика оценки волнового фронта может быть неприменима для оптических поверхностей со значительным СКО формы поверхности, так как волновой фронт, отразившийся от этой поверхности, также будет иметь значительное СКО. Без информации о параметрах поверхности оценка волнового фронта по приведенной методике может дать множество комбинаций радиуса и параметра *conic*.

Также необходимо учитывать параметры источника излучения, которые могут изменяться во времени. Более того, в методике предполагается, что источник излучения является точечным, поэтому в реальной установке требуется использовать источник с минимальным размером излучающей площадки.

Перед проведением измерений требуется начальная калибровка датчика волнового фронта, так как в реальной установке перед ним будет находиться объектив, имеющий ненулевые аберрации.

Заключение

Разработанная методика позволяет достаточно просто осуществлять измерения радиуса и эксцентриситета вогнутых крупногабаритных асферических зеркал с помощью датчика волнового фронта. Получены аналитические выражения, напрямую связывающие коэффициенты Цернике a_4 и a_9 с параметрами зеркала R_v и k . Показано, что методика не требует точной юстировки зеркала перед измерениями. Проведенный компьютерный анализ показал, что разработанная схема позволяет осуществлять измерения с погрешностями $\delta R_v < 0.1\%$ и $\delta k < 0.01$ для зеркал с радиусами от 100 до 2000 mm, а для зеркал с радиусами более 5000 mm $\delta R_v < 0.01\%$ и $\delta k < 0.001$.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Nikitin A., Sheldakova J., Kudryashov A. et al. // Proc. SPIE. 2016. V. 9754, Photonic Instrumentation Engineering III, 97540K. doi 10.1117/12.2219282
- [2] Gladysheva Y.V., Zhivotovsky I.V., Denisov D.G. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 584. N 1. 012020. doi 10.1088/1742-6596/584/1/012020
- [3] Patti M., Lombini M., Magrin D. et al. // Proc. SPIE. 2018. V. 10690, Optical Design and Engineering VII, P. 106902C. doi 10.1117/12.2312067
- [4] Breckinridge J.B. Basic Optics for the Astronomical Sciences. SPIE, 2012. 448 p.
- [5] Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev V.E. et al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5494, Optical Fabrication, Metrology, and Material Advancements for Telescopes. doi 10.1117/12.553006
- [6] Zhao C., Zehnder R., Burge J.H., Martin H.M. // Proc. SPIE. 2005. V. 5869, Optical Manufacturing and Testing VI, P. 586911. doi 10.1117/12.615465
- [7] Zhao C., Zehnder R., Burge J.H. // Optical Engineering. 2005. V. 44. N 9. 090506. (1 September 2005). doi 10.1117/1.2047594
- [8] Yi H., Zhang R., Hu X. et al. // Optics & Laser Technology. 2016. V. 43. N 4. P. 911–915. June 2011. doi 10.1016/j.optlastec.2010.09.014
- [9] Yang Z., Gao Z., Yuan Q. // Optics and Lasers in Engineering. 2013. V. 56. P. 35–40. May 2014. doi 10.1016/j.optlaseng.2013.12.008
- [10] Santiago-Alvarado A., Vazquez-Montiel S., Gonzalez-Garcia J., Lopez-Lopez A. // Proc. SPIE. 2008. V. 7066, Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology VI, P. 70660R. doi 10.1117/12.795725
- [11] Srivastava A.K., Sati K.C., Kumar S. // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2017. V. 8. N 7, July 2017.
- [12] Guy Artzner // Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A. 1998. V. 7. N 3. doi 10.1088/0963-9659/7/3/005
- [13] Nikitin A., Sheldakova J., Kudryashov A. et al. // Proc. SPIE. 2015. V. 9369, Photonic Instrumentation Engineering II, P. 936905. doi 10.1117/12.2085263
- [14] Nikitin A., Baryshnikov N., Denisov D. et al. // Proc. SPIE. 2018. V. 10539, Photonic Instrumentation Engineering V, P. 105390Z. doi 10.1117/12.2297078
- [15] Radiant Zemax, Zemax User's Manual, Radiant Zemax LLC, 2012. p. 205.
- [16] Михельсон Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. М.: Физико-математическая литература, 1995. 333 с.
- [17] Thorlabs Linear Translation Stage [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5697
- [18] Kovalev M.S., Krasin G.K., Odinokov S.B., Solomashenko A.B., Zlokazov E.Yu. // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 1563–1568. doi 10.1364/OE.27.001563
- [19] Razgulin A.V., Kuzhamaliyev Y.Z., Goncharov A.S. et al. // Atmos. Ocean Opt. 2017. V. 30. P. 399. doi 10.1134/S1024856017040091
- [20] Yoder P., Jr., Vukobratovich D. Opto-Mechanical Systems Design. V. 2. CRC Press, 2015. 502 p.
- [21] Piskunov T.S., Baryshnikov N.V., Zhivotovskii I.V. // Measurement Techniques. 2015. V. 58. N 3. P. 292–299. doi 10.1007/s11018-015-0702-6