

ВЫСОКОТОЧНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ РАДИУСОВ КРИВИЗНЫ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Н. В. БАРЫШНИКОВ¹, Д. Г. ДЕНИСОВ¹, В. Е. КАРАСИК¹, А. В. КУДРЯШОВ²,
А. Н. НИКИТИН³, А. А. САХАРОВ¹

¹ *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005, Москва, Россия
E-mail: denisov_dg@mail.ru*

² *Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ),
107023, Москва, Россия*

³ *ООО „Институт Адаптивной Оптики“,
115407, Москва, Россия*

Рассмотрена задача высокоточного контроля радиусов кривизны оптических зеркал, применяемого для современного метрологического обеспечения в оптических технологиях. Выполнен сравнительный анализ технических характеристик современных интерференционных систем и оптико-электронных приборов на основе датчиков волнового фронта типа Шака—Гартмана (ДВФ). Предложено оригинальное схмотехническое решение, позволяющее использовать оптико-электронные приборы на основе датчиков волнового фронта для измерения радиусов кривизны оптических поверхностей. Предложен и научно обоснован новый высокоточный метод контроля радиусов кривизны поверхностей зеркал с относительным отверстием 0,1 с допустимой погрешностью измерения менее 0,01 % от номинала. Проанализирован выходной параметр функциональной схемы прибора на основе ДВФ — предельный радиус регистрируемого волнового фронта.

Ключевые слова: *измерение радиуса кривизны, параметры формы, датчик волнового фронта, высокоточный контроль, систематическая погрешность измерения*

Высокоточный контроль профилей поверхностей (их радиусов кривизны) оптических зеркал, в том числе зеркал астрономических телескопов наземного и космического базирования, является одной из важнейших метрологических задач оптического производства, для реализации которой широко используют современные интерференционные методы [1]. Наиболее широко применяются интерферометры с совмещенными осветительной и измерительной ветвями, построенные по оптической схеме Физо [1, 2]. Такая конструктивная особенность позволяет устранить в процессе измерения фазовые искажения волновых фронтов, обусловленные погрешностью изготовления и сборки оптического тракта ветвей интерферометра, минимизируя при этом систематическую погрешность. Общим недостатком таких интерферометров является существенное влияние погрешностей изготовления эталонной поверхности на динамический диапазон измерения среднеквадратического значения распределения результирующей интенсивности.

Минимизировать систематические погрешности позволяет разработанная авторами настоящей статьи схема построения оптического тракта с совмещенными осветительной и измерительной ветвями, реализуемая за счет применения датчика волнового фронта (ДВФ) в приемном канале и не требующая использования эталонной поверхности при измерениях (рис. 1).

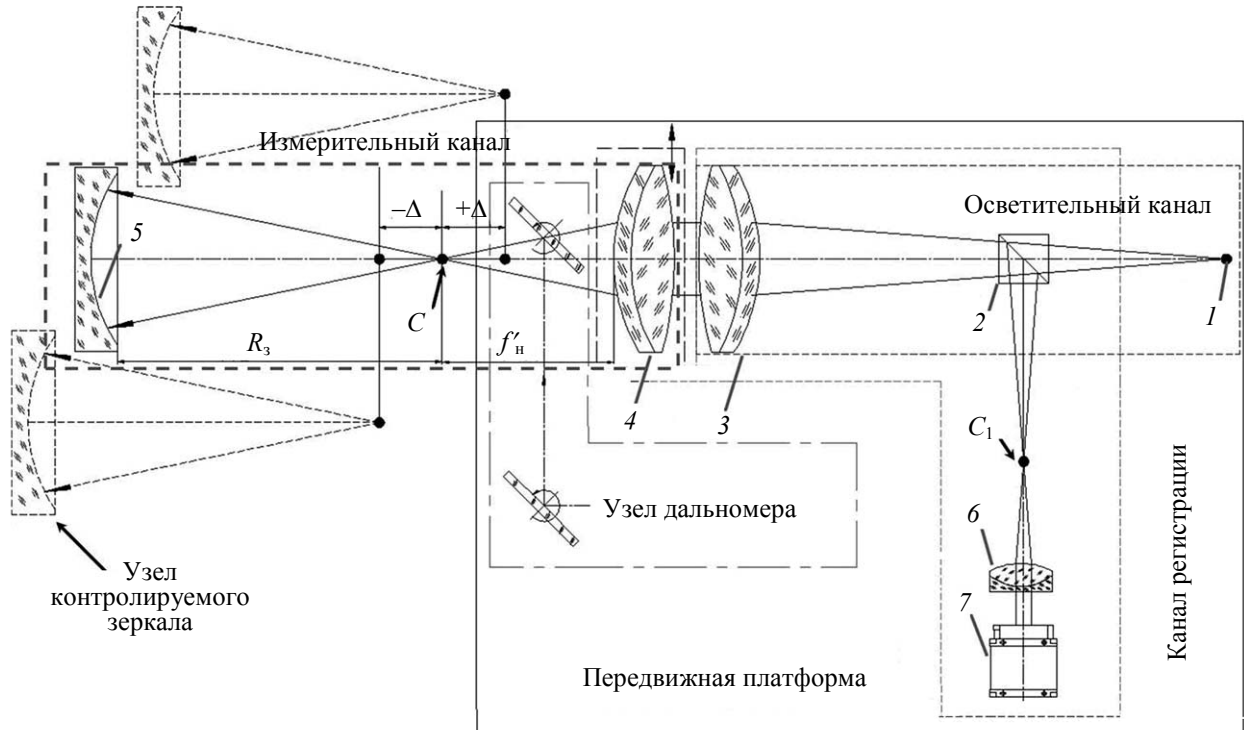


Рис. 1

Прибор содержит осветительный, измерительный каналы, канал регистрации, а также узел дальномера для определения предварительного положения прибора относительно поверхности зеркала. Все элементы оптического тракта прибора размещены на единой платформе, в соответствии с модульным принципом построения оптико-электронной аппаратуры, что позволяет в значительной степени упростить методику сборки и юстировки ее отдельных узлов.

В осветительном канале прибора располагается полупроводниковый лазер (длина волны $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$) с волоконным выходом 1, выходная апертура которого формирует лазерный пучок с заданной пространственной конфигурацией (расходимостью и диаметром пучка), имитируя точечный источник излучения. При прохождении светоделительного куба 2 расходящийся лазерный пучок преобразуется коллимационным объективом 3 в параллельный, собирающийся в точке на оси сменной фокусирующей насадки 4. При совмещении фокуса насадки с центром C радиуса кривизны контролируемого сферического зеркала 5 излучение, отражаясь от его поверхности, возвращается в приемный канал прибора. Пройдя через насадку 4 и объектив 3, пучок фокусируется на оптической оси в точке C_1 , которая оптически сопряжена с положением точечного источника 1 и совмещена с фокусом объектива 6 канала регистрации, преобразующим сферический волновой фронт лазерного пучка в плоский. Таким образом, измерение параметров формы сферического зеркала осуществляется по отклонению регистрируемого волнового фронта в плоскости линзового растра ДВФ 7 относительно опорного волнового фронта. Регистрируемый волновой фронт, который разбивается на отдельные области в пределах субапертур линзового растра, характеризуется положениями нормалей относительно плоскости фоточувствительных элементов матричного приемника излучения ДВФ.

Определяя угловые положения нормалей в пределах субапретур можно анализировать градиент регистрируемого волнового фронта с точностью, зависящей от конструктивных параметров ДВФ и особенностей алгоритмов обработки. Таким образом, принцип работы предлагаемой функциональной схемы основан не на традиционном анализе результирующего распределения интенсивности в интерферограмме, а на измерении параметров формы волнового фронта. Это исключает необходимость применения эталонных оптических поверхностей высокого качества, определяющих как точностные ограничения, так и динамический диапазон измерений в классических интерференционных системах, построенных по схеме Физо (см. таблицу).

Технические характеристики двух классов приборов

Характеристика прибора	Фазосдвиговый интерферометр на основе схем Физо	Оптико-электронный прибор с применением ДВФ
Диаметр входной апертуры прибора	До 100 мм	До 100 мм
Источник излучения	Газовый лазер (существенные габариты и длина когерентности, наличие спекл-шума при регистрации, флуктуации интенсивности)	Полупроводниковый лазер с волоконным выходом (минимальные габариты и длина когерентности, стабильность энергетического распределения профиля пучка)
Погрешность измерения	$\geq \lambda/15$	$< \lambda/100$
Повторяемость результатов измерения по PV*	< 4 нм	< 2 нм
Наличие эталонной поверхности в приборе	Да	Нет
Чувствительность к флуктуациям и вибрациям	Да	Нет
Возможность контроля радиуса кривизны сферических зеркал с центральным осевым отверстием	Нет	Да
Динамический диапазон измерений	$> \lambda/15$ по PV (определяется погрешностью эталонной детали)	Определяется характеристиками ДВФ, перепад регистрируемых радиусов волновых фронтов более 1 км

* Параметр PV — “peak-to-valley”, перепад между максимальным и минимальным значениями волнового фронта относительно опорного (среднеквадратического) уровня

Как видно из таблицы, максимальный динамический диапазон и погрешность измерений классических интерференционных систем ограничены среднеквадратическим отклонением формы профиля эталонной поверхности, составляющим $\lambda/15 \approx 0,04$ мкм ($\lambda = 0,6328$ мкм). Погрешность измерения параметров форм волновых фронтов с помощью оптико-электронного прибора на основе ДВФ составляет $\sim \lambda/100$ в широком динамическом диапазоне. Важно отметить, что указанные точностные характеристики прибора на основе ДВФ приводятся разработчиками в пределах значительного динамического диапазона контролируемых радиусов кривизны, при корректной записи опорного волнового фронта, обусловленной высокоточными методами калибровки ДВФ [1, 2].

Представленные проектные характеристики функциональных схем прибора наиболее перспективны для высокоточного контроля радиусов кривизны и параметров форм оптических зеркал в широком динамическом диапазоне измерений [1, 2]. В работе предлагается методика контроля радиусов кривизны сферических оптических зеркал.

Методика, основанная на измерении радиуса кривизны волнового фронта, отраженного от контролируемого зеркала, с помощью ДВФ, в заданном динамическом диапазоне, после калибровки датчика [1] содержит следующие этапы:

1) определение предельных радиусов кривизны регистрируемых волновых фронтов $\Delta R_{\text{ДВФ}}$;

2) расчет диапазона линейных смещений фокальных пятен, соответствующих значениям $\Delta R_{\text{ДВФ}}$;

3) определение значений смещений Δ прибора, соответствующих линейным смещениям фокальных пятен.

Таким образом, сначала регистрируется предельный радиус волнового фронта, соответствующий его максимальной кривизне [1, 2]:

$$R_{\text{ДВФ_min}} = \frac{D_{\text{ДВФ}}^2}{4C_{21}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{ДВФ}}$ — диаметр входной апертуры ДВФ; $C_{21} = -1 + 2x^2 + 2y^2$ — коэффициент Цернике в разложении волнового фронта по полиномам, характеризующий значение его кривизны или дефокусировки; x и y — координаты.

Далее измеряется предельный радиус, соответствующий минимальной кривизне регистрируемого волнового фронта в плоскости линзового раstra ДВФ, определяемого среднеквадратической погрешностью нахождения энергетического центра тяжести светового пятна σ_{min} , формируемого элементом линзового раstra в плоскости матричного фотоприемного устройства [1, 2]:

$$R_{\text{ДВФ_max}} = \frac{D_{\text{ДВФ}} f'_p}{2\sigma_{\text{min}}}, \quad (2)$$

f'_p — фокусное расстояние элемента микролинзового раstra.

В итоге определяется полный динамический диапазон измеряемых радиусов волновых фронтов, соответствующий угловым наклонам нормалей в пределах субапертур линзового раstra ДВФ [2]:

$$\Delta R_{\text{ДВФ}} = R_{\text{ДВФ_max}} - R_{\text{ДВФ_min}} = D_{\text{ДВФ}} \left(\frac{f'_p}{2\sigma_{\text{min}}} - \frac{D_{\text{ДВФ}}}{4C_{21}} \right), \quad (3)$$

Значение $\Delta R_{\text{ДВФ}}$ определяет диапазон смещений регистрируемых фокальных пятен, причем величина $R_{\text{ДВФ_max}}$ соответствует нулевому смещению, а $R_{\text{ДВФ_min}}$ — его максимальному значению [1, 2]:

$$\Delta S_{\text{max}} = \frac{\left(0,5d_p - \frac{\lambda f'_p}{d_p} \right)}{f'_p} D_{\text{ДВФ}}, \quad (4)$$

где ΔS_{max} — максимальное линейное смещение фокальных пятен в пределах субапертур линзового раstra ДВФ; d_p — диаметр элемента микролинзового раstra.

Этот диапазон линейных смещений (4) обеспечивается смещением фокуса оптической насадки (рис. 1, 4) относительно центра кривизны контролируемого зеркала (рис. 1, точка C) на величину Δ , при которой регистрируется волновой фронт максимальной кривизны $R_{\text{ДВФ_min}}$.

В этом случае достигается минимальная погрешность регистрируемого радиуса волнового фронта, пропорциональная его абсолютному значению (1):

$$\Delta R_{\min} \approx \sqrt{\left(\frac{dR_{\text{ДВФ}_{\min}}}{dC_{21}}\right)^2 (\Delta C_{21})^2} = R_{\min} \left(\frac{\Delta C_{21}}{C_{21}}\right), \tag{5}$$

где $\Delta C_{21}/C_{21}$ и ΔC_{21} — относительная и абсолютная погрешности определения коэффициента дефокусировки (полинома Цернике).

При помощи встроенного в схему узла дальномера определяется первоначальное положение прибора относительно зеркала. Эта информация позволяет совместить фокус оптической насадки с центром кривизны сферической поверхности зеркала и определить реперную точку отсчета измерений. Затем формируется управляющий сигнал на механизм привода продольного перемещения Δ платформы прибора, и измеряются радиусы кривизны волновых фронтов. Таким образом, определяются направление перемещения прибора и его максимальное смещение Δ_{\max} , при котором осуществляется регистрация предельного радиуса волнового фронта максимальной кривизны $R_{\text{ДВФ}_{\min}}$, соответствующего контролируемому радиусу кривизны сферического зеркала R_3 (см. рис. 1).

Для определения функциональной зависимости регистрируемого предельного радиуса от конструктивных параметров (S_i — фокусные расстояния, рабочие отрезки, воздушные промежутки, контролируемый радиус кривизны сферического зеркала и др.) оптической схемы прибора — $R_{\text{ДВФ}_{\min}}(S_i)$ — составляется эквивалентная расчетная схема его измерительного и приемного каналов (рис. 2, номера элементов на рисунке соответствуют номерам элементов на рис. 1).

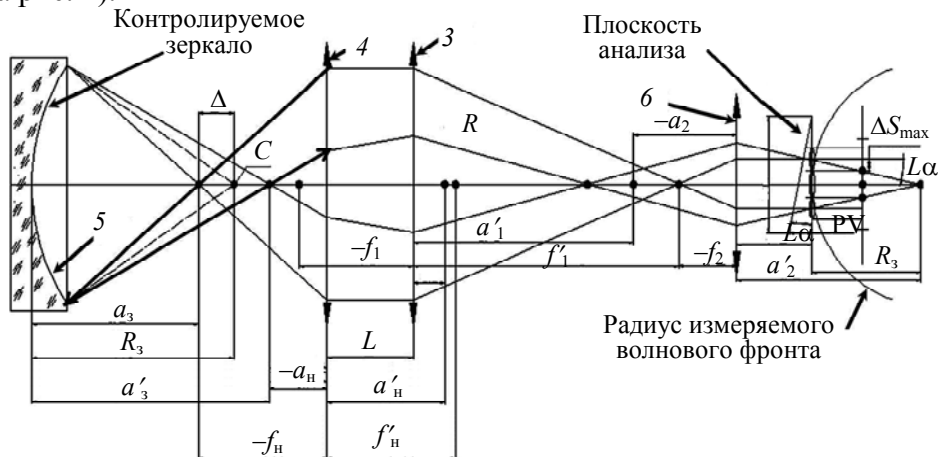


Рис. 2

Анализ геометрического хода крайних лучей (в соответствии с правилами знаков) от объекта исследования — вогнутого зеркала 5 — через все элементы оптического тракта 4, 3, 6 до плоскости анализа (плоскости линзового растра ДВФ), с учетом величины максимального смещения Δ_{\max} позволяет вычислить радиус кривизны волнового фронта

$$R_{\text{ДВФ}}(\Delta, f'_n) = \frac{(f'_2)^2}{f'_1} - l \left(\frac{f'_2}{f'_1}\right)^2 + \left(\frac{f'_2}{f'_1}\right)^2 \left[f'_n + \frac{(f'_n)^2 (f_3 + \Delta)}{\Delta \cdot R_3 + \Delta^2} \right], \tag{6}$$

где l — расстояние между главными оптическими поверхностями объектива и фокусирующей насадки; f'_n, f'_1, f'_2, f_3 — фокусы насадки, объективов измерительного, приемного каналов и контролируемого зеркала соответственно.

Следует отметить, что выражения (3) и (6) позволяют описать аппаратную характеристику прибора в целом

$$\frac{D_{\text{ДВФ}}^2}{4C_{21}} \leq R_{\text{ДВФ}}(\Delta, f'_H) \leq \frac{D_{\text{ДВФ}} f'_p}{2\sigma_{\text{min}}}. \quad (7)$$

Анализ формул (6) и (7) позволяет также выделить значения области неопределенности функции $R_{\text{ДВФ}}(\Delta, f'_H)$ при аргументах $\Delta = -R_3; 0$.

На рис. 3 представлен диапазон возможных перемещений прибора на основе ДВФ от Δ_{min} до Δ_{max} в окрестности центра кривизны контролируемого зеркала для последующей регистрации предельного радиуса волнового фронта $R_{\text{ДВФ_min}}(\Delta, f'_H)$, соответствующего максимальному линейному смещению энергетического центра тяжести светового пятна, формируемого линзовым растром внутри динамического диапазона ДВФ (4).

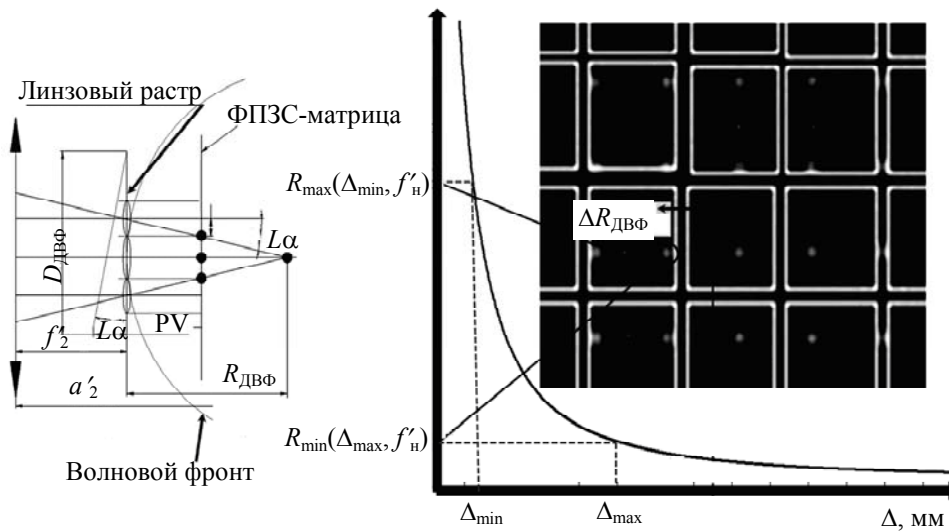


Рис. 3

Полученная аппаратная характеристика ДВФ (кривая на рис. 3) в заданном динамическом диапазоне (7) позволяет определить численные значения контролируемых радиусов кривизны оптических зеркал:

$$R_3(\Delta, f'_H) = \frac{R_{\text{ДВФ_min}}(\Delta, f'_H)(f'_1)^2 \Delta^2 - f'_1(f'_2)^2 \Delta^2 + l(f'_2)^2 \Delta^2 - f'_H(f'_2)^2 \Delta^2 - \Delta(f'_2)^2 (f'_H)^2}{R_{\text{ДВФ_min}}(\Delta, f'_H)(f'_1)^2 \Delta - f'_1(f'_2)^2 \Delta + l(f'_2)^2 \Delta - f'_H(f'_2)^2 \Delta - 0,5(f'_2)^2 (f'_H)^2}. \quad (8)$$

Для численного анализа функциональной зависимости (8) был проведен габаритный расчет осветительного, измерительного и регистрирующего каналов прибора, в результате которого определены оптимальные по абберационной коррекции конструктивные параметры прибора: $l = 20$ мм; $f'_2 = 40$ мм; $f'_1 = 200$ мм.

Использование нескольких сменных фокусирующих насадок позволяет проводить измерения целого ряда значений радиусов сферических поверхностей оптических зеркал. При этом значения фокусных расстояний фокусирующих насадок в приборе определяются относительными отверстиями и уравнениями профилей контролируемых зеркал. Так, для контроля поверхности зеркала с асферическим профилем необходимо обеспечить равенство апертурных углов насадки и зеркала. Однако при контроле сферических зеркал можно проводить измерения в меньшем апертурном угле благодаря применению длиннофокусных фокусирующих насадок, обеспечивая максимальное число засвечиваемых эффективных элементов линзового растра. Такая особенность позволяет в значительной степени увеличить точность

проводимых измерений различных радиусов кривизны сферических зеркал относительно одного опорного волнового фронта.

Было проведено численное моделирование процедуры контроля сферических зеркал с радиусами кривизны 100, 1000 и 4000 мм и относительным отверстием $D_3/R_3=0,1$.

Для оценки системных погрешностей рассматриваемых радиусов кривизны сферических зеркал выражение (8) продифференцировано в частных производных по каждому из конструктивных параметров с учетом распределенных погрешностей входящих в него величин: $\Delta f'_1=0,001$ мм; $\Delta f'_2=0,001$ мм; $\Delta f'_H=0,001$ мм; $\Delta=6$ мкм (паспортная характеристика погрешности минимального шага привода); $\Delta l=0,001$ мм:

$$\sigma_{R_3} = \sqrt{\left(\frac{dR_3}{df'_1}\right)^2 (\Delta f'_1)^2 + \left(\frac{dR_3}{df'_2}\right)^2 (\Delta f'_2)^2 + \left(\frac{dR_3}{df'_H}\right)^2 (\Delta f'_H)^2 + \left(\frac{dR_3}{d\Delta}\right)^2 (\Delta \Delta)^2 + \left(\frac{dR_3}{dl}\right)^2 (\Delta l)^2 + \left(\frac{dR_3}{\Delta_{R_{ДВФ_min}}}\right)^2 (\Delta_{R_{ДВФ_min}})^2} \quad (9)$$

В процессе моделирования был использован ДВФ, имеющий следующие параметры: размер ПЗС-матрицы 1" ; диаметр микролинзового раstra $d_p = 136$ мкм ; фокусное расстояние микролинзового раstra $f'_p = 3,6$ мм ; динамический диапазон (по PV), определяемый фокусом и диаметром раstra [2]: $\Delta S_{max} = 4C_{21} = 40$ мкм .

Число засвечиваемых эффективных элементов линзового раstra (81) вполне удовлетворяет требованиям работы ДВФ [3, 4]. Тогда в соответствии с (5) среднеквадратическое значение предельного радиуса в (9) составляет 0,0625 мм.

Важно отметить, что существенным образом значение $\Delta_{R_{ДВФ_min}}$ определяется величиной фокусного расстояния элемента линзового раstra — f'_p (рис. 4). Анализ выражения (4) показывает, что при работе с короткофокусными элементами линзового раstra динамический диапазон измерений ΔS_{max} увеличивается при снижении точности, и наоборот. Тем не менее достигнутая в этом случае минимальная систематическая погрешность контроля радиуса кривизны сферического зеркала удовлетворяет современным требованиям метрологического обеспечения [3—6].

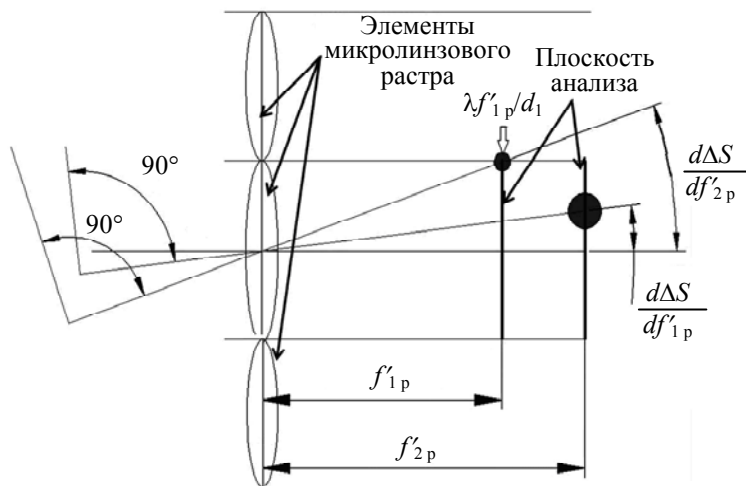


Рис. 4

Анализ приведенных на рис. 4 расчетных зависимостей между погрешностью измерения $d\Delta S_{max}/df'_p$, максимальным динамическим диапазоном ΔS_{max} и корректно выбранным

значением фокусного расстояния элемента линзового раstra — $f'_p = 3,6$ мм позволяет обеспечить допустимую погрешность измерения в широком динамическом диапазоне при рекомендуемой величине числа Френеля $N_{Fr} = d_p^2 / (f'_p \lambda) \approx 2,2$ [4].

Для заданных проектных параметров прибора на основе ДВФ проведен теоретический анализ зависимости систематической погрешности контроля рассматриваемых радиусов сферических зеркал от выбранных фокусных расстояний фокусирующих насадок.

Анализ показывает, что увеличение фокусного расстояния фокусирующей насадки вызывает уменьшение систематической погрешности контроля радиусов кривизны. Погрешность контроля радиуса кривизны сферического зеркала с относительным отверстием 0,1 составляет $\sim 0,01$ % от номинального значения.

Показана возможность применения оптико-электронного прибора на основе ДВФ в задачах контроля радиусов кривизны сферических профилей оптических зеркал с погрешностью, удовлетворяющей требованиям аппаратуры современного метрологического обеспечения. Предложен и научно обоснован новый метод измерения радиусов кривизны сферических зеркал в широком динамическом диапазоне относительно одного опорного волнового фронта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikitin A. N., Kudryashov A. V., Sheldakova J., Denisov D., Karasik V., Sakharov A. Hartmannometer vs Fizeau interferometer: advantages and drawbacks // SPIE Conf. and Exhibitions "Photonics West—2015". San Francisco, California, 7—12 February 2015. P. 9369-5.
2. Nikitin A. N., Sheldakova J., Kudryashov A. V., Borsoni G., Denisov D., Karasik V., Sakharov A. A device based on the Shack-Hartmann Wave Front sensor for testing wide aperture optics // SPIE Conf. Photonics West, Opto, Photonic Instrumentation Engineering III. San Francisco, California, 13—18 February 2016. Vol. 9754. P. 97540K-01.
3. Neal D. R., Copland J., and Neal D. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy // Advanced Characterization Techniques for Optical, Semiconductor, and data Storage Components. 2002. Vol. 4779. P. 148—160.
4. Шанин О. И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках. М.: Техносфера, 2012. 200 с. ISBN 978-5-94836-313-4.
5. Neal D. R., Gruetzner J. K., Topa D. M., Roller J. Use of beam parameters in optical component testing // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4451. P. 394—405.
6. Neal D. R., Armstrong D. J. and Turner W. T. Wavefront sensors for control and process monitoring in optics manufacture // Proc. SPIE. 1997. Vol. 2993. P. 211—220.

Сведения об авторах

- Николай Васильевич Барышников** — д-р техн. наук, доцент; МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра лазерных и оптико-электронных систем; заведующий кафедрой; E-mail: denisov_dg@mail.ru
- Дмитрий Геннадьевич Денисов** — канд. техн. наук, доцент; МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра лазерных и оптико-электронных систем; E-mail: denisov_dg@mail.ru
- Валерий Ефимович Карасик** — д-р техн. наук, профессор; МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра лазерных и оптико-электронных систем; зам. заведующего кафедрой; E-mail: denisov_dg@mail.ru
- Алексей Валерьевич Кудряшов** — д-р техн. наук, профессор; Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ); E-mail: denisov_dg@mail.ru
- Александр Николаевич Никитин** — ООО „Институт Адаптивной Оптики“; научный сотрудник; E-mail: denisov_dg@mail.ru
- Алексей Александрович Сахаров** — МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра лазерных и оптико-электронных систем; ст. преподаватель; E-mail: denisov_dg@mail.ru

Рекомендована кафедрой
лазерных и оптико-электронных систем

Поступила в редакцию
20.06.16 г.

Ссылка для цитирования: Барышников Н. В., Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Кудряшов А. В., Никитин А. Н., Сахаров А. А. Высокоточный метод контроля радиусов кривизны оптических поверхностей // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 12. С. 1034—1042.

HIGH-PRECISION METHOD FOR CONTROL OF CURVATURE RADII OF OPTICAL SURFACES

N. V. Baryshnikov¹, D. G. Denisov¹, V. E. Karasik¹, A. V. Kudryashov²,
A. N. Nikitin³, A. A. Sakharov¹

¹ Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia
E-mail: denisov_dg@mail.ru

² Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Russia

³ Adaptive Optics Institute Ltd., 115407, Moscow, Russia

The actual problem of modern metrological maintenance in optical technologies related to high-precision control of the radius of curvature and shape parameters of optical mirrors is discussed. A comparative analysis of technical characteristics of modern interference systems and optical-electronic devices based on wavefront sensors such as Shack — Hartmann (SHWFS) is presented. An original circuit solution for development of a modernized functional diagram of the interference control equipment based on wavefront sensor (OEDWFS) for measuring optical surface curvature radius is described. A new high-precision method for control of curvature radius of surface mirrors with a permissible error of the measurement less than 0,01 % of the nominal value is proposed and scientifically justified. An analysis is given of the output parameter of the functional circuit of the DWF-based instrument — the limiting radius of the recorded wavefront.

Keywords: curvature radius and shape parameters measurement, wavefront sensor, high-precision control, systematic measurement error

Data on authors

- | | |
|-------------------------------|--|
| Nikolay V. Baryshnikov | — Dr. Sci., Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Laser and Optical-Electronic Systems; Head of the Department; E-mail: denisov_dg@mail.ru |
| Dmitrii G. Denisov | — PhD, Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Laser and Optical-Electronic Systems; E-mail: denisov_dg@mail.ru |
| Valeriy E. Karasik | — Dr. Sci., Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Laser and Optical-Electronic Systems; Deputy Head of the Department; E-mail: denisov_dg@mail.ru |
| Alexey V. Kudryashov | — Dr. Sci., Professor; Moscow Polytechnic University; E-mail: denisov_dg@mail.ru |
| Alexander N. Nikitin | — Adaptive Optics Institute Ltd.; Scientist; E-mail: denisov_dg@mail.ru |
| Alexey A. Sakharov | — Bauman Moscow State Technical University, Department of Laser and Optical-Electronic Systems; Senior Lecturer; E-mail: denisov_dg@mail.ru |

For citation: Baryshnikov N. V., Denisov D. G., Karasik V. E., Kudryashov A. V., Nikitin A. N., Sakharov A. A. High-precision method for control of curvature radii of optical surfaces // Izv. vuzov. PriBORostROeniE. 2016. Vol. 59, N 12. P. 1034—1042 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-12-1034-1042