ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ

DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.4.318.327

Методы контроля формы осевых и внеосевых асферических поверхностей с дифракционным оптическим элементом, определением децентрировки и учетом дисторсии при их формообразовании

Часть 1

| | | | | |

А.П. Семенов<sup>1</sup>, М.А. Абдулкадыров<sup>1</sup>, В.Е. Патрикеев<sup>1</sup>,

А.Б. Морозов<sup>1</sup>, Р.К. Насыров<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> АО «Лыткаринский завод оптического стекла», Лыткарино, Моск. обл., Россия
- <sup>2</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

В АО ЛЗОС уже много лет для контроля поверхностей крупногабаритных оптических деталей астрономического и космического назначения используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ) или Computer Generated Holograms (CGH). С их помощью выполняется контроль формы асферических поверхностей, контроль формы внеосевых асферических поверхностей с фиксированием внеосевых параметров и ориентации зеркал, контроль положения вершины асферической поверхности относительно геометрического центра зеркала, учет дисторсии в изображении интерферограмм, контроль взаимной юстировки зеркал в схемах контроля и т.д. Таким образом, ДОЭ стали неотъемлемой частью современного контроля асферических поверхностей

Testing Methods for the Shape of Axial and Extra-Axial Aspherical Surfaces with a Computer-Generated Holograms, Decentering Determination and Distortion Consideration During its Formation

Part I

A. P. Semenov<sup>1</sup>, M. A. Abdulkadyrov<sup>1</sup>, V. E. Patrikeev<sup>1</sup>, A. B. Morozov<sup>1</sup>, R. K. Nasyrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lytkarinsky Optical Glass Plant, Lytkarino, Moscow region.

<sup>2</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

LZOS JSC has been using the diffractive optical elements (DOE) or computer-generated holograms (CGH) for many years to test the surfaces of large-sized optical mirrors for astronomical and space purposes. They are used for aspherical surface shape testing, control of the shape of extra-axial aspherical surfaces with registration of extra-axial mirror parameters and orientation, testing of the aspherical surface vertex position relative to the mirror geometric center, distortion consideration in the interferogram images, mutual adjustment of mirrors in the testing schemes, etc. Thus, the CGHs have become an integral part of the up-todate testing of aspherical surfaces of the largesized optical mirrors and optical systems.

**Keywords:** testing of aspherical surfaces, largesized optical systems, synthesized diffraction gratings, distortion during formation

> Received on: 05.04.2022 Accepted on: 04.05.2022



#### крупногабаритных оптических зеркал и оптических систем.

Ключевые слова: контроль асферических поверхностей, крупногабаритные оптические системы, синтезированные дифракционные решетки, дисторсия при формообразовании

> Статья получена: 05.04.2022 Статья принята: 04.05.2022

овременные оптико-электронные системы позволяют решать проблемы, которые еще 10-15 лет назад казались недосягаемыми. Во многом это связано с развитием компьютерных технологий приема и передачи информации, совершенствованием устройств на ПЗС-приемниках, созданием лазерных измерительных систем и появлением уникальных технологий контроля формы поверхности с использованием корректоров волнового фронта дифракционных оптических элементов (ДОЭ или ССН – Computer-Generated Holograms) [1–6], а также усложнением оптических элементов, включая высокоапертурные внеосевые зеркала, контроль и формообразование которых ранее выполнить не представлялось возможным.

### КОНТРОЛЬ И ФОРМООБРАЗОВАНИЕ АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ С ОТКЛОНЕНИЕМ ОТ ОСЕВОЙ СИММЕТРИИ

Для описания процессов контроля и формообразования поверхностей крупногабаритных астрономических зеркал воспользуемся результатами формообразования 4-х метрового главного зеркала турецкого телескопа DAG (Doğu Anadolu Gözlemevi). DAG – телескоп системы Ричи-Кретьена с активной и адаптивной оптикой, который будет установлен в новой обсерватории, расположенной на горе высотой 3170 м, вблизи Эрзурума в Турции [7-8]. Телескоп имеет фокусное расстояние 56 м и поле зрения 30 угловых минут, два фокуса Несмита. Телескоп включает вогнутое гиперболическое зеркало M1 и выпуклое гиперболическое зеркало M2, плоское зеркало M3, поворачивающее оптическую ось по направлению к двум фокусам Несмита при помощи системы вращения.

Разработкой конструкции и изготовлением телескопа занимается бельгийская фирма AMOS. АО ЛЗОС по контракту с AMOS выполнил работы по изготовлению оптики для данного телескопа. Главное вогнутое гиперболическое зерhe advanced optoelectronic systems allow to solve problems that have seemed unresolvable even 10–15 years ago. This is largely due to the development of computer technologies for data receipt and transfer, improvement of the CCD sensor-based devices, introduction of the laser measuring systems and occurrence of the unique surface shape control technologies using the wavefront correctors, such as the diffractive optical elements (DOE, or CGH – computer-generated holograms) [1–6], as well as the complication of optical elements, including the highaperture extra-axial mirrors, the testing and formation of which have not been previously possible.

OPTICAL DEVICES & SYSTEMS

#### TESTING AND FORMATION OF THE OPTICAL COMPONENT ASPHERICAL SURFACE WITH DEVIATION OF AXIAL SYMMETRY

In order to describe the testing and formation processes for the surfaces of large-sized astronomical mirrors, we will use the formation results of the 4-meter main mirror of the Turkish DAG telescope (Doğu Anadolu Gözlemevi). DAG is a Ritchey-Chrétien telescope with the active and adaptive optics to be installed in a new observatory located on a 3170 m mountain near Erzurum in Turkey [7–8]. The telescope has a focal distance of 56 m and a field of 30 arc minutes, as well as two Nasmyth foci. The telescope includes a concave hyperbolic mirror M1 and a convex hyperbolic mirror M2, a flat mirror M3 that rotates the optical axis towards two Nasmyth foci using a rotation system.

The telescope design and production are performed by the Belgian company AMOS. Under the contract with AMOS, LZOS JSC manufactured the optics for this telescope. The main concave hyperbolic mirror has a diameter of 4 m, a vertex radius  $R_c$ =14420 mm ± 12 mm (F/1.80), a conical constant K=-1.006574±0.0004, an asphericity of 153 µm at full diameter and 139 µm in the light area, the mirror is made of Zerodur<sup>®</sup> by SCHOTT.

The mirror formation procedure includes grinding and polishing the optical aspherical surface. During the mirror processing and testing, a membrane and pneumatic frame was used that held the mirror on 66 supporting interface elements [9–11]. The mirror was tested on a vertical stand, the upper platform of which had the control equipment with a CGH corrector.

Stress relief on the membrane and pneumatic frame supports differs from stress relief using a standard telescope frame, where the additional end interface elements are used. Moreover, various forces are applied to each support. Stress relief on the membrane and pneumatic supports is designed to relieve



ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ

кало имеет диаметр 4 м, вершинный радиус  $R_c$ =14420 мм±12 мм (F/1.80), коническую константу K=-1,006574±0,0004, асферичность 153 мкм на полном диаметре и 139 мкм в световой области, материал зеркала Zerodur фирмы SCHOTT.

Формообразование зеркала включает операции по шлифованию и полированию оптической асферической поверхности. При обработке и контроле зеркала использовалась мембраннопневматическая оправа, которая удерживала зеркало на 66 опорных интерфейсных элементах [9–11]. Контроль зеркала выполнялся в вертикальном стенде, на верхней площадке которого установлено контрольное оборудование с ДОЭ корректором.

Разгрузка на опорах мембранно-пневматической оправы отличается от разгрузки на штатной оправе телескопа, где задействованы еще дополнительные торцевые интерфейсные элементы и, кроме того, прикладываются различные усилия к каждой опоре. Разгрузка на мембранно-пневматических опорах рассчитана на то, чтобы равномерно разгрузить зеркало с одинаковыми усилиями, или с одинаковым весом на каждую мембрану. Поэтому необходимо было произвести модельные расчеты деформаций рабочей поверхности зеркала на мембранно-пневматической оправе в сравнении с разгрузкой на штатной оправе и учитывать эту разницу в процессе формообразования [12].

Мембранно-пневматическая оправа обеспечивает погрешности в деформациях формы поверхности зеркала в процессе технологического и аттестационного контроля в пределах, меньших по амплитуде, чем требуемый размах ошибок поверхности обрабатываемого зеркала. Каждая мембранная опора тарируется, чтобы обеспечить одинаковое усилие на зеркало, с точностью менее 10 г, в заданной точке тыльной поверхности зеркала, на каждую опору приходится нагрузка в 65 кг. Оправа снабжена системой автоматической стабилизации положения зеркала при изменении внешних условий (атмосферного давления, влажности) во время контроля, что обеспечивает неизменное состояние формы поверхности с необходимой точностью при повторном контроле. Оправа представлена на рис. 1-2.

В соответствии с результатами моделирования было рассчитано, что если располагать мембраны в точках приложения усилий штатной оправы, то возникают деформации на поверхности, основные из которых расфокусировка, астигматизм, триангулярная кома и сферическая аберрация. Остальные деформации, «следы» от элементов разгрузки – высокочастотные деформации, одиthe mirror evenly with the same forces, or with the same weight on each membrane. Therefore, it was necessary to make model calculations of the mirror face deformations on a membrane and pneumatic frame in comparison with stress relief using a standard frame and consider this difference in the formation process [12].

The membrane and pneumatic frame leads to the errors in the mirror surface shape deformations during the process and certification monitoring within the limits smaller in amplitude than the required error range of the processed mirror surface. Each membrane support is calibrated to provide the same force on the mirror, with an accuracy of less than 10 g. At a given point on the back mirror surface, each support has a load of 65 kg. The frame is equipped with a mirror automatic stabilization system in the case of changes of environmental conditions (atmospheric pressure, humidity) during testing that ensures the unchanged surface shape with the required accuracy during the repeated testing. The frame is shown in Fig.1–2.

In accordance with the simulation results, it is calculated that if the membranes are located at the loading points of the standard frame, then deformations occur on the surface. Such deformations mainly include defocusing, astigmatism, triangular coma, and spherical aberration. The remaining deformations, such as the "traces" of the stress relief elements (high-frequency deformations that are equal on the standard frame and on the process one), are rather insignificant and are eliminated in the formation process. Defocusing is 1.5  $\mu$ m and leads to the radius error of only 0.12 mm. However, it can also be considered during formation.

By subtracting the simulated wavefront from the wavefront obtained during the mirror surface inspection, we thereby eliminate the difference between stress relief on a standard frame and on a process one when processing is performed according to the specification requirements. Possible errors in simulation of differences in the mirror stress relief during processing and during operation shall be compensated by the mirror action system.

The wavefront shape and the relevant interferogram to be obtained on a membrane and pneumatic frame, are shown in Fig. 3-4. The subtracted wavefront chart was confirmed by mutual independent calculations of AMOS and LZOS. The required values of wavefront errors were also given. Thus, it is necessary to form a "free form" surface with deviations of the axisymmetric aspherical surface. Such a surface can

OPTICAL DEVICES & SYSTEMS



наковые на штатной оправе и на технологической, малы и устраняются в процессе формообразования. Расфокусировка составляет величину 1,5 мкм и вносит ошибку в радиусе всего в 0,12 мм, но и ее можно учесть при формообразовании.

Вычитая смоделированный волновой фронт из получаемого волнового фронта в процессе контроля поверхности зеркала, мы тем самым устраним разницу между разгрузкой на штатной оправе и на технологической при обработке до требований спецификации. Возможные погрешности в моделировании различия в разгрузках зеркала при обработке и при эксплуатации будут скомпенсированы активной системой воздействия на зеркало.

Форма волнового фронта и соответствующая ему интерферограмма, которые необходимо было получить на мембраннопневматической оправе, представлены на рис. 3-4. Вычитаемая карта волнового фронта была подтверждена взаимными независимыми расчетами АМОЅ и ЛЗОС. Также даны тре-

буемые величины ошибок волнового фронта. Т.е. необходимо формообразовать поверхность «свободной формы» (free form) с отклонениями от осесимметричной асферической поверхности. Такую поверхность можно получить только с использованием автоматизированной системы формообразования поверхности малыми инструментами.

Для контроля зеркала использовался ДОЭ корректор, рассчитанный и изготовленный в Институте автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск [13-17]. Корректор рассчитан на номинальные параметры зеркала. Схема контроля представлена на рис. 5 [20]. Расстояние от корректора до точки фокуса 1170 мм. ДОЭ преобразует сферический волновой фронт в асферический и работает в автоколлимации. Корректор изготовлен на кварцевой пластине диаметром 102 мм (рис. 6,7). Он имеет рабочую зону диаметром 80 мм и вспомогательную настроечную кольцевую поверхность диаметрами от 82 до 92 мм. Расстояние от голограммы



**Рис. 1. Мембранно-пневматическая оправа** Fig. 1. Membrane and pneumatic frame



**Рис. 2.** Зеркало на технологической оправе Fig. 2. Mirror on a process frame

only be obtained using an automated surface formation system with the small tools.

The mirror testing was performed using a CGH corrector designed and manufactured at the Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk [13-17]. The corrector is designed for the nominal mirror parameters. The testing circuit is shown in Fig. 5 [20]. The distance from the corrector to the focal point is 1170 mm. The CGH converts a spherical wavefront into an aspherical one and operates in the autocollimation state. The corrector is made on a quartz plate with a diameter of 102 mm (Fig. 6, 7). It has a working area with a diameter of 80 mm and an auxiliary adjusting annular surface with the diameters from 82 to 92 mm. The distance from the hologram to the focal point is 1170 mm. For the test verification of the CGH corrector. a CGH simulator was made on an Astrositall substrate with a diameter of 102 mm and a working area of 92 mm in diameter.

# hv

# ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ



**Fig. 3.** Wavefront shape during stress relief of the mirror with a process frame

до точки фокуса 1170 мм. Для тестовой проверки ДОЭ корректора изготовлен ДОЭ имитатор на подложке из Астроситалла диаметром 102 мм с рабочей зоной диаметром 92 мм.

Для описания и анализа формы отраженного волнового фронта в настоящее время используются полиномы Цернике или степенные полиномы. Дополнительно определяют степень «гладкости» поверхности, вычисляя среднеквадратичный наклон нормалей к волновому фронту (RMS Slope), который измеряется в угловых секундах. Также могут быть заданы требования на аберрации отраженного волнового фронта, описываемые отдельными членами ряда полиномов Цернике. В частности, на отклонения волнового фронта для зеркала М1 были даны ограничения, представленные в таблице. Вычисленные значения полиномиальных коэффициентов в нанометрах представлены также в таблице.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЦЕНТРИРОВКИ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ

Контроль зеркал на финишной стадии полирования выполняется с использованием ДОЭ. ДОЭ позволяет не только определять форму отраженного волнового фронта контролируемой асферической поверхности, но и положение вершины асферической поверхности и вычислять ее смещение относительно геометрического центра детали. Ранее для этих целей использовался метод контроля с линейным трехточечным сфероме-



The Zernike polynomials or power polynomials are currently used to describe and analyze the the reflected wavefront shape. Additionally, the degree of surface "smoothness" is determined by calculating the root-mean-square slope of the normals to the wavefront (RMS Slope) that is measured in arc seconds. The requirements can also be set to the aberrations of the reflected wavefront, described by individual terms of a series of Zernike polynomials. In particular, the following restrictions given in Table 1 were imposed on the wavefront deviations for the M1 mirror. The calculated values of the polynomial coefficients in nanometers are also given in Table 1.

# DETERMINATION OF OPTICAL AXIS DECENTERING

The mirror testing at the final stage of polishing is performed using the CGH. The CGH makes it possible to determine not only the reflected wavefront shape of the controlled aspherical surface, but also the aspherical surface vertex position. It also helps to calculate its displacement relative to the geometric center of the part. Previously, the control method with a linear three-point spherometer was used for these purposes [18-19]. At present, the displacement can be determined using the CGH. As an example, we will consider the main mirror DAG M1 with a diameter of 4000 mm and an appropriate corrector.

An unequal-arm interferometer with a reference spherical mirror and a beam-splitting cube (1 in Fig. 5) contains a DOE 2, 3 is the controlled surface. The main

**OPTICAL DEVICES & SYSTEMS** 

тром [18-19]. В настоящее время смещение можно определить с помощью ДОЭ. В качестве примера снова рассмотрим главное зеркало DAG M1 диаметром 4000 мм с соответствующим корректором.

Неравноплечий интерферометр с эталонным сферическим зеркалом и светоделительным кубиком (позиция 1 на рис. 5) содержит ДОЭ 2, 3 – это контролируемая поверхность.

На оптической круглой подложке ДОЭ 4 изготовлена основная дифракционная структура 5, вокруг нее дополнительная фокусирующая кольцевая структура 6, и вторая дополнительная кольцевая центрирующая структура 7 для центрирования ДОЭ



**Таблица.** Отклонения волнового фронта, разложенные в ряд по полиномам Цернике различного порядка (order) в нм (RMS)

**Table.** Wavefront deviations transformed by the Zernike polynomials of variousorder in nm (RMS)

Order 2	Order 3	Order 4	Order 5	Order 6	Order 7–11
Zernike 5–6 Astigmatism, nm	Zernike 9–10 Triangular, nm	Zernike 11–15 Ast4 + Spherical, nm	Zernike 16–21 Triangular5 + Coma5, nm	Zernike 22–28, nm	Zernike 29–78, nm
50	20	8	7	4	5
11	8	7	6	4	4

diffractive structure 5 is made on the CGH optical round substrate 4, an additional focusing ring-type structure 6 is placed around it, and a second additional ring-type centering structure 7 is designed for the CGH centering in relation to the interferometer.

The focusing structure 6 is located in a ring with the radii from 80.4 to 84.4 mm and the centering structure 7 is located in a ring with the radii from 86 to 96 mm. The distance from the focus F of the lens 1 to the CGH 2 is 1170 mm, the distance from the CGH 2 to the mirror 3 is L=14274 mm.

The positioning accuracy of a point simulating the aspherical surface vertex depends on the DOE installation accuracy relative to the interferometer. If the CGH is based on a divergent beam, it is adjusted using an auxiliary reflective centering structure of the CGH surface. Such a reflective structure is designed so that an endless band appears on it when the CGH is precisely aligned with the interferometer.

In real practice, the vertex point is shown as a spot. The spot size was determined by the Rayleigh criterion 2.44  $\lambda L/D$ , where D is the focusing structure diameter, and  $\lambda$ =0.6328 µm is the interferometer wavelength. It is obvious that the vertex displacement (48 µm) is less than the inherent size of the spot (260 µm). However, in practice, even one band is difficult to be available consistently, usually there can be three or four such bands. Therefore, the vertex displacement shall be multiplied by the number of bands. This is true for a small number of bands on the interferogram. Thus, the error of this method makes it possible to determine the mirror vertex position with an accuracy of about 300 µm.

During the testing procedure, the mirrors are adjusted, and the CGH 2 is centered relative to the interferometer according to the wavefront interferogram from the centering structure 7. The luminous point (spot) 8 from the focusing structure 6 shall coincide with the geometric mirror center. To mate-



# ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ

относительно интерферометра. Фокусирующая структура 6 располагается в кольце с радиусами от 80,4 до 84,4 мм и центрирующая структура 7 – в кольце с радиусами от 86 до 96 мм. Расстояние от фокуса F объектива 1 до ДОЭ 2 равно 1170 мм, расстояние от ДОЭ 2 до зеркала 3 L=14274 мм.

Точность позиционирования точки, имитирующей вершину асферической поверхности, зависит от точности установки ДОЭ относительно интерферометра. В том случае, когда ДОЭ работает из расходящегося пучка, он юстируется при помощи вспомогательной отражающей центрирующей структуры поверхности ДОЭ. Такая отражающая структура рассчитывается так, что на ней возникает бесконечная полоса, когда ДОЭ точно выставлен относительно интерферометра.

В реальности точка в вершине отображается пятном. Размер пятна определялся по критерию Рэлея 2,44  $\lambda$ L/D, где D – диаметр фокусирующей структуры, а  $\lambda$ =0,6328 мкм – длина волны интерферометра. Очевидно, что смещение вершины (48 мкм) меньше размера самого пятна (260 мкм). Однако на практике, даже одну полосу сложно стабильно выставить, обычно их может быть тричетыре. Поэтому, смещение вершины необходимо умножить на количество полос. Это верно для небольшого числа полос на интерферограмме. Таким образом, погрешность указанного метода позволяет определить положение вершины зеркала с точностью порядка 300 мкм.

Во время контроля зеркала настраивают и центрируют ДОЭ 2 относительно интерферометра по интерферограмме волнового фронта от центрирующей структуры 7, а также, чтобы светящаяся точка (пятно) 8 от фокусирующей структуры 6 совпадала с геометрическим центром зеркала. Для материализации геометрического центра детали использовался имитатор вершины в виде вставки с перекрестием (рис. 8, 9).

Наличие децентрировки оптической оси рабочей поверхности детали выражается в ассиметричной аберрации комы третьего порядка в отраженном от поверхности волновом фронте. Для синхронизации процесса центрировки оборудования контроля с контролируемой поверхностью и процесса интерферометрического контроля в районе имитатора вершины для наблюдения лазерной точки маркера вершины была установлена видеокамера (рис. 8) с передачей информации по Wi-Fi, что позволило наблюдать одновременно положение маркера вершины и интерференционную картину.

С помощью основной структуры 5 ДОЭ проводился интерферометрический контроль формы



rialize the geometric center of the part, a vertex simulator was used in the form of an insert with a cross (Fig. 8, 9).

Availability of an optical axis decentering on the part working surface is represented by an asymmetrical aberration, namely a third-order coma (Fig. 12–13) in the wavefront reflected from the surface. The video camera was installed in order to synchronize the alignment process for the control equipment and



**Рис. 7.** ДОЭ для контроля поверхности зеркала **Fig. 7.** CGH for the mirror surface testing

OPTICAL DEVICES & SYSTEMS

### 



**Рис. 8.** Имитатор вершины зеркала с видеокамерой фиксации положения оптической вершины зеркала **Fig. 8.** Mirror vertex simulator with a video-recording of the mirror optical vertex position



**Рис. 9.** Луч от ДОЭ совмещен с механической осью зеркала **Fig. 9.** Beam from the CGH aligned with the mechanical

асферической поверхности. По смещению светящейся точки 8 (рис. 5) от центра квадрата (рис. 9-11) определялась децентрировка.

Когда во время интерферометрического контроля устраняется децентрировочная кома, по смещению светящегося пятна, имитирующего физическую вершину зеркала, замеряем вели-

чину децентрировки (рис. 10). И наоборот, совместив светящееся пятно с положением геометрического центра, определяем величину децентрировочной комы и по ней определяем величину децентрировки (рис. 9-11). В результате определяется величина и направление децентрировки оптической оси по децентрировочной коме (рис. 12, 13). Смещение оптической оси на 1 мм дает коэффициент комы С3=4,05. Величина коэффициента децентрировочной комы по результатам аттестации зеркала составляла C<sub>3</sub>=0,689l, что соответствует величине смещения оптической оси 0,2 мм.

Следует отметить, что в данном случае децентрировка устранялась в процессе формообразования, что требовалось the controlled surface and the interferometric inspection process in the vertex simulator area

Рис. 10. Сторона квадрата

5 мм. Децентрировочная

кома выбрана. Смещение

драта показывет наличие

Fig. 10. The square side is 5 mm.

The decentering coma is selected.

The dot displacement from the

available decentering of 7 mm

square center indicates the

точки от центра ква-

децентрировки 7 мм

mirror axis



Рис. 11. Сторона квадрата 5 мм. Децентрировочная кома, устранена путем формообразования поверхности. Точка совмещена с геометрическим центром, т.е оптическая вершина совпадает с геометрическим центром с точностью менее 1 мм Fig. 11. The square side is 5 mm. The decentering coma is eliminated by the surface formation. The point is aligned with the geometric center, i.e. the optical vertex coincides with the geometric center with an

**PHOTONICS** VOL. 16 №4 2022 325

accuracy of less than 1 mm





# ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ

по условиям спецификации. Указанный метод теоретически позволяет определить положение вершины зеркала с точностью порядка 300 мкм, а предложенный способ измерения и устранения децентрировки значительно эффективнее применяемого механического способа измерения с помощью сферометра [18–19].

И еще одно важное преимущество способа по сравнению с указанным выше аналогом: он может использоваться для измерения децентрировки внеосевых асферических деталей, когда на ДОЭ есть несколько фокусирующих структур, с помощью которых выполняют юстировку ДОЭ относительно внеосевой детали и определяют положение оптической вершины, находящейся вне детали, с необходимой точностью.

Таким образом, с использованием специальных фокусирующих структур на ДОЭ можно не только определить смещение оптической оси относительно геометрического центра детали, но и устранить децентрировку в процессе формообразования в соответствии с требованиями спецификации.

В продолжение статьи будут рассмотрены особенности контроля внеосевых асферических поверхностей с ДОЭ и контроль и формообразование внеосевого асферического зеркала.

#### REFERENCES

- Poleshchuk A. G., Matochkin A. E. Lazernye metody kontrolya asfericheskoj optiki. Photonics Russia. 2011;2:38–44. Полещук А. Г., Маточкин А. Е. Лазерные методы контроля асферической оптики. Фотоника. 2011;2:38–44.
- Poleshchuk A. G., Homutov V. N., Matochkin A. E., Nasyrov R. K., CHerkashin V. V. Lazernye interferometry dlya kontrolya formy opticheskih poverhnostej. Photonics Russia. 2016;4: 38–50. Полещук А. Г., Хомутов В. Н., Маточкин А. Е., Насыров Р. К., Черкашин В. В. Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей. Фотоника. 2016;4: 38–50.
- Tom L. Zobrist, James H. Burge, Warren B. Davison, Hubert M. Martin. Measurements of large optical surfaces with a laser tracker. Proc. of SPIE. 2008; 701:70183U1–70183U-12. DOI: 10.1117/12.789934.
- Martin H. M., Burge J. H., Cuerden B., Davison W. B., Kingsley J. S., Kittrell W. C., Lutz R. D., Miller S. M., Zhao C., Zobrist T. Progress in manufacturing the first 8.4 m off-axis segment for the Giant MagellanTelescope. Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation. Proc. SPIE. 2008;7018. DOI: 10.1117/12.789805.
- Burge J. H., Kot L. B., Martin H. M., Zehnder R., Zhao C. Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments. Proc. SPIE. 2006;6273: 6273-22-16273-22-12. DOI: 10.1117/12.672484.
- Martin H. M., Allen R. G., Burge J. H. et al. Production of primary mirror segments for the Giant Magellan Telescope», in Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation. Proc. SPIE. 2014; 9151: 91510J. DOI: 10.1117/12.2057012.
- Sahmali A. E., Yesilyaprak C., Sinan K. Yerli S. K., Keskin O. Observatory building design: a case study of DAG with infrastructure and facilities. Proc. SPIE. 2016;9911: 99112S-1-99112S-4. DOI:10.1117/12.2234386.
- Pirnay O., Lousberg G. et al. DAG 4m telescope: assembly, integration and testing. Proc. SPIE. 2018; 10700, Ground-based and Airborne Telescopes VII,



**Рис. 12.** Модельная интерферограмма децентрировочной комы C<sub>3</sub>= 0.689I, определяющая величину смещения оптической оси

**Fig. 12.** Model interferogram of decentering coma  $C_3$ = 0.6891 that determines the optical axis displacement value

to observe the vertex marker laser point (Fig. 8). It provided data transmission via Wi-Fi that made it possible to simultaneously observe the vertex marker position and the interference pattern.

Using the main structure of the CGH 5, the interferometric inspection of the aspherical surface shape was performed. The displacement of the luminous point 8 (Fig. 5) from the square center (Fig. 9, 10, 11) was used to determine decentering.



#### **Рис. 13.** Форма поверхности детали с децентрировочной комой

Fig. 13. The part surface shape with a decentering coma

107001Y (6 July). DOI:10.1117/12.2313476.

- Semenov A. P., Abdulkadyrov M. A., Patrikeev A. P., Patrikeev V. E., Pridnya V. V. M1 and M2 mirror manufacturing for ARIES project: current status. Proc SPIE. 2010;7739: 773907. DOI: 10.1117/12.856107.
- Semenov A. P. Accomplished the task of production of the primary and secondary mirrors of Devasthal Optical Telescope under the project ARIES (India, Belgium, Russia): fabrication features. Proc SPIE. 2012;8450: 84504R-1-84504R-14. DOI: 10.1117/12.924645.
- Abdulkadyrov M. A., Semenov A. P. et al. Production of M1, M2 and M3 mirrors for DAG project (Belgium, Russia). Current status. Proc. SPIE. 2018;10706: 1070631-1-1070631-14. DOI: 10.1117/12.2311637.
- Abdulkadyrov M. A., Semenov A. P., Dobrikov N. S., Ignatov A. N., Patrikeev V. E. Factors, affectting the mirror figure stability, and methods used to eliminate them. Proc. SPIE. 2020;11451. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV, 114514C-1–114514C-8 (). DOI: 10.1117/12.2561085.
- Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Asfour J.-M. Computer generated holograms: fabrication and application for precision optical testing. *Proc SPIE*. 20087102, 710206. DOI: 10.1117/12.797816.
- 14. Poleshchuk A. G. Computer generated holograms for aspheric optics testing. Proc SPIE. 2009; 7133:713333-1-713333-9. DOI: 10.1117/12.821243.
- 15. Poleshchuk A. G. Fabrication and application of diffractive optical elements. Proc. SPIE. 2010;7544:75443L-1-75443L-12. DOI: 10.1117/12.887434.
- Semenov A. P., Abdulkadyrov M. A. et al. Difrakcionnye opticheskie elementy (CGH) dlya kontrolya, yustirovki i pozicionirovaniya asfericheskih poverhnostej astronomicheskih i kosmicheskih zerkal. Kontenant. 2019; 18(4): 72–74.
  Семенов А. П., Абдулкадыров М. А. и др. Дифракционные оптические элементы (CGH) для контроля, юстировки и позиционирования асферических поверхностей астрономических и космических зеркал. Контенант. 2019; 18(4): 72–74.
- Semenov A. P., Abdulkadyrov M. A. et al. Experience of Computer Generated Holograms (CGH) Application for Testing, Alignment and Positioning of Astronomical and Space Mirrors Aspherical Surfaces. Proc. SPIE. 2019; 11341: 113411L-1-113411L-8. DOI: 10.1117/12.2547477.
- Semenov A. P. Metod opredeleniya decentrirovki asfericheskoj poverhnosti otnositel'no geometricheskogo centra astronomicheskogo zerkala. Opticheskij zhurnal. 2015; 82(2):43–50. OCIS: 220.0220; 220.0230; 220.4610; 350.1260; DOI: 10.1364/JOT.82.000095.

Семенов А. П. Метод определения децентрировки асферической поверхности относительно геометрического центра астрономического зеркала. Оптический журнал. 2015; 82(2):43–50. OCIS: 220.0220; 220.0230; 220.4610; 350.1260; DOI: 10.1364/JOT.82.000095.

 RU Patent 2534815. A method for measuring the decentering of the optical axis of an aspherical surface and a spherometer for implementing the method / Semenov A. P., Patrikeev V. E.

Патент RU 2534815. Способ измерения децентрировки оптической оси асферической поверхности и сферометр для осуществления способа / Семенов А. П., Патрикеев В. Е.

### АВТОРЫ

Семенов Александр Павлович, к.т.н., ведущий инженер, АО «ЛЗОС», www.lzos.ru, Лыткарино, Моск. обл., Россия.

ORSID ID 0000-0001-8769-8111

Участие: программно-математическая реализация обработки результатов контроля, формообразование асферической оптики, анализ и подготовка технических материалов.

Абдулкадыров Магомед Абдуразакович, к.т.н., помощник главного инженера АО «ЛЗОС», www.lzos.ru, Лыткарино, Моск. обл., Россия.

Участие: общее руководство, административное сопровождение.

Патрикеев Владимир Евгеньевич, зам. начальника, АО «ЛЗОС» Участие: математическое моделирование обработки результатов оптического контроля.

Морозов Алексей Борисович, начальник бюро, АО «ЛЗОС». Участие: разработка и монтаж стенда контрольного оборудования, проведение контроля асферики, разработка методики контроля и его анализа.

Насыров Руслан Камильевич,к.т.н., зав. лаборатории, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия. Участие: расчет и изготовление корректоров волнового фронта. When the decentering coma is prevented during the interferometric inspection, we measure the decentering value based on displacement of the luminous spot imitating the physical mirror vertex (Fig. 10). To the contrary, by aligning the luminous spot with the geometric center position, we are able to establish the decentering coma value and, therefore, determine the decentering value (Fig. 9–11). As a result, the optical axis decentering value and direction are determined based on the decentering coma. The optical axis displacement by 1 mm leads to a coma coefficient  $C_3$ =4.05. The decentering coma coefficient value according to the mirror certification results was  $C_3$ =0.6891 that corresponds to an optical axis displacement of 0.2 mm.

OPTICAL DEVICES & SYSTEMS

It should be noted that in this case decentering was eliminated in the formation process that was required by the specifications. This method theoretically allows to determine the mirror vertex position with an accuracy of about 300  $\mu$ m. Moreover, the proposed method for decentering measurement and elimination is much more efficient than the applied mechanical measurement method with a spherometer [18–19].

One more important advantage of this method in comparison with the above analogue is that it can be used to measure decentering of extra-axial aspherical parts, when there are several focusing structures on the CGH that are used for the CGH adjustment relative to the extra-axial part and determination of position of the optical vertex located outside the part, with the required accuracy.

Thus, using special focusing structures on the CGH, it is possible not only to determine the optical axis displacement relative to the geometric center of the part, but also to eliminate decentering in the formation process in accordance with the specification requirements.

In the continuation of the article, the features of the control of offaxis aspherical surfaces with CGH and the control and shaping of an off-axis aspherical mirror will be considered.

### **ABOUT AUTHORS**

Semenov Aleksander Pavlovich, Cand.of Sc.(Eng.), a leading engineer of Lytkarinsky Optical Glass Plant, LZOS JSC, www.lzos.ru. ORSID ID 0000-0001-8769-8111

Participation: software and mathematical implementation of the testing results, formation of aspherical optics, technical materials analysis and preparation.

Abdulkadyrov Magomed Abdurazakovich, Cand.of Sc.(Eng.), assistant chief engineer of Lytkarinsky Optical Glass Plant, LZOS JSC, www.lzos.ru. Participation: overall supervision, administrative support.

Patrikeev Vladimir Evgenievich – deputy head of Lytkarinsky Optical Glass Plant,

LZOS JSC. Participation: mathematical modeling of the optical inspection results. Morozov Aleksey Borisovich, head of the bureau, LZOS JSC. Participation: development and installation of a control equipment stand,

aspheric control, development and instantation of a control equipment stand, aspheric control, development of control methods and its analysis.

Nasyrov Ruslan Kamilevich, Cand.of Sc.(Eng.), Ilaboratory head, IAE SB RAS. Novosibirsk. Participation: design and production of wavefront correctors.