

Метод определения профиля шлифованной асферической поверхности крупногабаритных астрономических зеркал

Абдулкадыров М.А., Патрикеев В.Е., Семенов А.П.

lastro@lzos.ru

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыткарино, Московская обл.

Описан метод определения абсолютного профиля шлифованной асферической поверхности крупногабаритных астрономических зеркал с использованием линейного трехточечного сферометра, последовательного перемещаемого перпендикулярно направлению от центра до края детали. Описан способ определения вершинного радиуса. Приведены примеры успешного использования метода при изготовлении зеркал телескопов VST (VLT Survey Telescope), TNT (Thai National Telescope), VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy), DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope for Aryabhata Research Institute of Observational Sciences) и др.

Ключевые слова: телескопы, астрономические зеркала, контроль асферической шлифованной поверхности зеркала, линейный сферометр.

Введение

При шлифовании рабочей поверхности и асферизации шлифованием используются как классические методы обработки, так и асферизация малым инструментом на станках с компьютерным управлением. Для создания управляющей программы обработки необходима информация о форме поверхности, т.е. топографическая карта. Ее можно получить различными способами.

1. С помощью 3-D машины, позволяющей непосредственно измерять форму рабочей поверхности в трехмерном измерении, сравнивать эту форму с требуемой и находить отклонения, т.е. строить карту отклонений от требуемой формы. Например, в ОАО ЛЗОС для деталей диаметром до 1400 мм с успехом используется 6-координатная измерительная машина КИМ-1400, российского производства (Саратов), дающая точность отклонений от требуемой асферической поверхности в 2-3 мкм. Она построена по принципу гексапода с измерительной головкой [1]. Использование такой машины для измерений и построение карты поверх-

ности весьма эффективно для процесса шлифования и особенно для асферизации внеосевых оптических деталей. Такая технология опробована и оправдала себя в конкретном производстве. Данным методом достигаются отклонения от требуемой формы поверхности менее 5-8 мкм.

2. Известны способы определения формы оптической поверхности с измерением отклонений от сферической с использованием механических измерений [2, 3, 4]. В профилометре (*the swing arm profilometer*) измерительную головку, закрепленную на поворотной наклонной штанге, последовательно перемещают механически по большим дугам по контролируемой поверхности и с помощью самописца снимают показания индикатора измерительной головки (рис. 1).

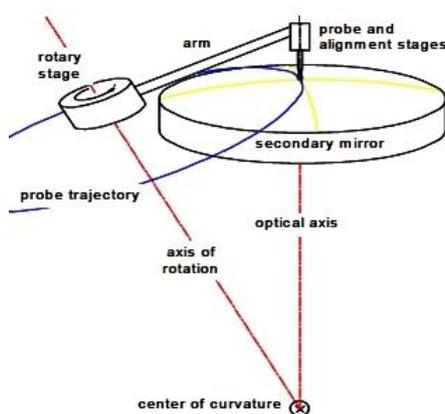


Рис. 1. Профилометр для измерения профиля асферической поверхности

Профилометр с поворачивающейся рукой измеряет отклонения вдоль дуги на поверхности детали с центром окружности, расположенной на оси, проходящей через центр кривизны ближайшей сферы контролируемой поверхности. Измерения выполняются по нормали к поверхности, и, тем самым, измеряются отклонения асферической поверхности от сферы по дугам, проходящим через вершину асферической поверхности. Однако из соображений жесткости штанги и необходимой точности измерений способ применим для контроля зеркал относительно небольшого диаметра (не более 1 м).

3. Для деталей любых размеров, выпуклых и вогнутых, но осесимметричных, применим метод трехточечного линейного сферометра [1]. В основе методики использовано свойство асферических поверхностей: изменение радиуса на различных зонах поверхности. При установке линейного сферометра на асферическую поверхность между краевыми и центральной ножками измеряется стрелка прогиба, величина которой изменяется при перемещении сферометра.

4. Для деталей произвольной формы на стадии шлифования может быть использован ИК-интерферометр в сочетании с зеркальным корректором волнового фронта [1]. Зеркальный корректор для ИК-диапазона ($\lambda=10.6$ мкм), например, использовался для автоматизированной асферизации главных зеркал проектов VST (*VLT Survey Telescope*) [6] и VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) [5,7].

5. Также для измерения поверхностей любой формы деталей диаметром до 500 мм разработан специальный прибор бесконтактного измерения NANOMEFOS (Nanometer Accuracy Non-contact Measurement of Free-form Optical Surfaces) [8].

Есть и еще ряд новых методов.

Процесс обработки оптики является эффективным, когда используются оптимальные из перечисленных методов для каждого конкретного случая.

Задача поиска эффективного способа получения профиля асферической поверхности для высокоасферических поверхностей, когда ИК-интерферометр еще не представляется возможным использовать, а требуется получить как можно более подробный профиль асферической поверхности для использования программно-управляемой обработки, привели к необходимости модифицировать способ измерения профиля сферометром для крупногабаритных оптических деталей диаметром как до 1 м, так и для деталей диаметром до 6 м.

1. Теория метода

Для измерения профиля высокоточных асферических поверхностей крупногабаритных оптических деталей, в частности, зеркал телескопов, используется линейный трехточечный сферометр. С помощью трехточечного сферометра с двумя агатовыми ножками на концах и индикаторной головкой с ценой деления 0.1 мкм, установленной посередине, с базой сферометра, равной «а» (расстоянию между двумя крайними агатовыми ножками сферометра), измеряют стрелки прогиба вдоль диаметрального направления или по хорде, касательной к центральному отверстию на детали (для деталей с центральным отверстием). Сферометр последовательно смещают на величину $a/2$ таким образом, чтобы одна крайняя ножка сферометра перемещалась в положение центральной ножки, центральная в положение второй крайней ножки, а вторая крайняя ножка в новое положение. Таким образом, проходят весь диаметральный отрезок или хорду с шагом в половину базы сферометра. При этом радиус детали (диаметр, хорду) разбивают на отдельные промежутки «а», укладываемые на полном радиусе детали. Сравнивают результаты с расчетными величинами стрелок прогиба для каждого положения сферометра и по данным измерениям строят относительный профиль отклонений от ближайшей асферической поверхности для выполнения процесса шлифования.

Дискретность построенного профиля составляет половину базы сферометра, уменьшение базы сферометра приводит к увеличению погрешности определения профиля. Для более точного построения профиля поверхности можно использовать сферометр с двумя, тремя и более индикаторными головками [9] (рис. 2). Точность измерений сферометра может достигать величины 0.2 мкм при базе сферометра до 1 м с определением профиля в 5-10 мкм (среднеквадратичное) и измерением радиуса кривизны крупногабаритного зеркала с точностью в 10 мм для радиуса в 30 м.

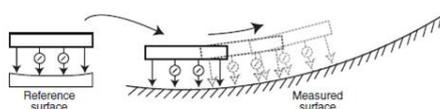


Рис. 2. Сферометр для контроля профиля асферической поверхности.

Практическое использование данного метода в реальных измерениях показало, что с увеличением базы сферометра существенно возрастают его собственные деформации, меняющиеся из-за изменения его наклона к горизонтальному положению при перемещении его вдоль диаметрального направления, что приводит к существенным погрешностям в измерениях и, соответственно, к существенным ошибкам в построении профиля.

В предлагаемом способе определения профиля шлифованной асферической поверхности также используется линейный трехточечный сферометр с базой «а» с индикатором посередине. Сферометр помещается в заранее рассчитанные точки. Обычно для устойчивости сферометра на вогнутой или выпуклой поверхности его снабжают хотя бы одной вспомогательной боковой регулируемой ножкой-упором. Эта боковая ножка позволяет регулировать наклон сферометра и устанавливать его по нормали к контролируемой поверхности. Сферометр обнуляется на эталонной поверхности с известным радиусом, близким к интервалу радиусов асферической поверхности. Устанавливают сферометр крайними ножками перпендикулярно диаметральному сечению в краевую зону детали с радиусом R_i (рис. 3), затем перемещают сферометр крайними ножками в зону с радиусом $R_{i+1} = \sqrt{R_i^2 - (a/2)^2}$, в которой до этого располагалась центральная ножка с индикатором.

Затем на основании геометрических соотношений строят абсолютный профиль отклонений поверхности от заданного (теоретического) профиля с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом и необходимым допуском на них.

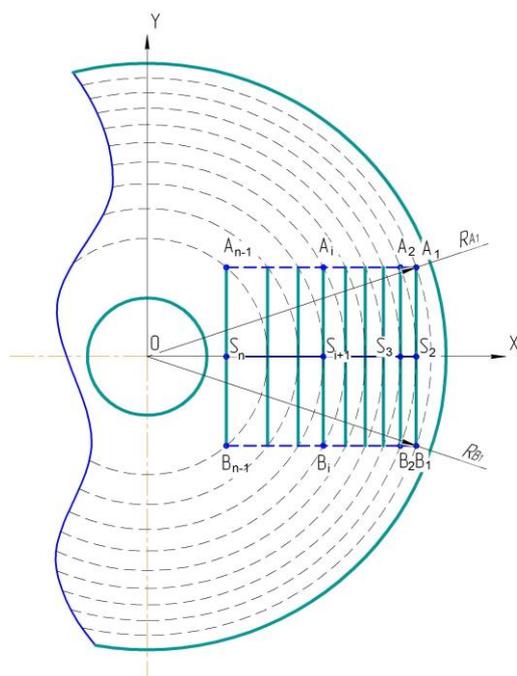


Рис. 3. Схема установки ножек сферометра на поверхности и схема для расчета установочных точек

При таком методе измерений существенно увеличивается количество измеренных точек, т.е. мы получаем более подробную информацию о профиле поверхности, чем при продольных измерениях профиля, что важно для анализа профиля поверхности и выполнения процесса асферизации.

Сферометр с базой «а» ($A_1 - B_1$ на рис. 3), расстоянием «b» до 4-й боковой ножки от центральной (рис. 4), обеспечивающей нормальное к поверхности положение сферометра, помещают на эталонную поверхность, обнуляют, устанавливая крайними ножками на контролируемую деталь перпендикулярно диаметральному сечению и по нормали к поверхности (рис. 4) в первую краевую зону детали (в точки A_1, B_1 рис. 3, рис. 5) с радиусом R_{A1} в плоскости XY, в которой отклонение профиля принимается равным $P_1 = 0$.

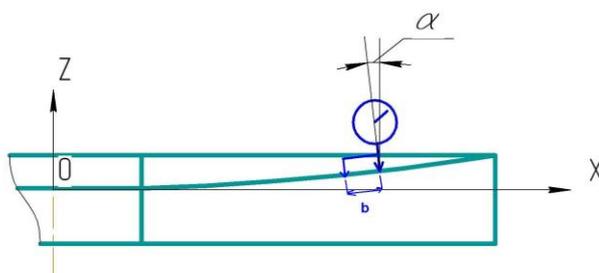


Рис. 4. Схема расположения индикатора

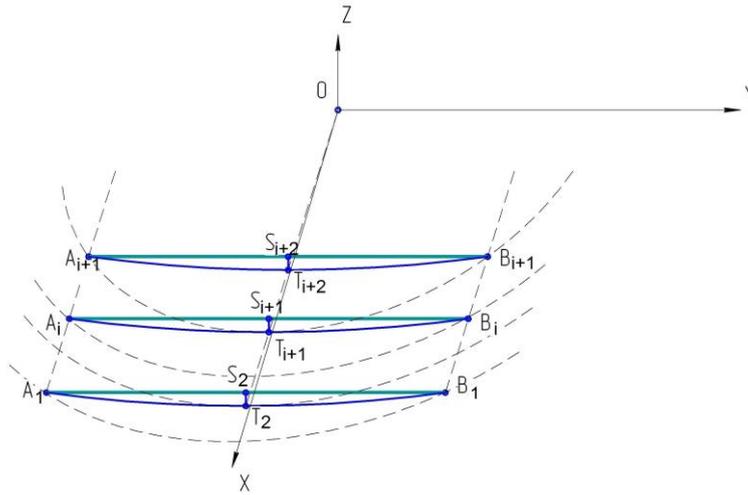


Рис. 5. Схема опорных точек и отрезков

Снимают показания сферометра $\Delta S_{1, \text{измер}}$ относительно эталонной поверхности в точке T_2 на зоне с расстоянием от центра $R_{A2} = \sqrt{R_{A1}^2 - (a/2)^2}$, в которой теоретическое значение должно быть $\Delta S_{2, \text{теор}}$. Определяется добавка к профилю $\Delta p_2 = \Delta S_{2, \text{измер}} - \Delta S_{2, \text{теор}}$ и отклонение профиля в точке $P_2 = P_1 + \Delta p_2$. Сферометр перемещают крайними ножками на зону, в которой располагалась центральная ножка. Снова выполняют измерения стрелки прогиба и определяют отклонения профиля в точке $P_{i+1} = P_i + \Delta p_i$ и процесс измерений продолжают до центра детали или до центрального отверстия $P_n = P_{n-1} + \Delta p_{n-1}$ и строят абсолютный профиль с отклонениями от поверхности с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом.

$\Delta S_{i, \text{теор}}$ определяется из уравнения асферической поверхности, которое в общем виде записывается следующим образом:

$$z = \frac{cS^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2 S^2}} + A_1 S^4 + A_2 S^6 + A_3 S^8 + A_4 S^{10},$$

где $S^2 = x^2 + y^2$;

$c = 1/R_0$ – величина, обратная вершинному радиусу;

$K = -e^2$, где e – эксцентриситет поверхности;

A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты асферики для поверхностей более высокого порядка (выше 2-го).

Определяем значения z_{A1}, z_{A2}, z_{T2} , определяем стрелку с вычетом стрелки эталонной поверхности $\text{arow}_{\text{сферы}}$:

$$\Delta S_{i, \text{теор}} = (z_{A1} - z_{T2} - \text{arow}_{\text{сферы}}) \cdot \cos(\alpha),$$

где угол α – угол между вертикалью и нормалью к поверхности в измеряемой точке.

2. Практические результаты

Реализация способа представлена на примере асферизации шлифованием и измерениях сферометром главного зеркала диаметром 3700 мм Devasthal Optical Telescope (DOT) for Aryabhata Research Institute of Observational Sciences (ARIES) [10] со световым измеряемым диаметром 3670 мм, вершинным радиусом кривизны асферической поверхности, равным 14639,0 мм, конической константой $K=1,03296$, диаметром отверстия 720 мм. Для измерений использовали линейный трехточечный сферометр с индикаторной головкой посередине с ценой деления 0.1 мкм, с базой «а» (расстояние между крайними ножками сферометра), равной 622 мм и боковой регулируемой по высоте вспомогательной ножкой, закрепленной сбоку индикатора на расстоянии 62 мм. Для обнуления индикатора было изготовлено контрольное эталонное зеркало с радиусом 14727,0 мм, учитывая что радиус ближайшей к асферической поверхности сферы равен 14700,2 мм. Асферичность профиля составляет 106 мкм.

Как уже отмечалось, при измерении сферометром вдоль диаметрального направления или вдоль хорды, с увеличением базы сферометра существенно возрастают его собственные деформации, меняющиеся из-за изменения его наклона к горизонтальному положению, что приводит к существенным погрешностям в измерениях и, соответственно, к существенным ошибкам в построении профиля. В этом способе трудно учесть такие погрешности наклона в двух плоскостях. В описываемом способе при измерениях сферометр устанавливается перпендикулярно радиальному направлению и имеет наклон только в одной плоскости. Изменения показаний сферометра от деформаций при наклоне определялись экспериментально и данная поправка вводилась в расчет. Например, в описываемом случае поправка при наклоне сферометра к вертикальному положению на 10° составляет 5 мкм.

На рис. 6 приведены результаты расчета отклонений профиля по описанной методике, причем не от ближайшей поверхности, а от поверхности с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом. $Z_{тр.ноги}$, $Z_{всп.ноги}$ – координаты третьей, вспомогательной ножки на поверхности детали в мм (начало координат в точке вершины детали, координата Y перпендикулярна оптической оси Z). $ПС_{теор.}$ и $ПС_{факт.}$ – теоретические и фактически измеренные отклонения стрелки прогиба от эталонной сферической поверхности в мкм, Y – расстояние от центра детали в мм, $Z_{теор.}$ и $Z_{факт.}$ – теоретическое и фактическое значение координаты Z . $Асф. Теор.$ и $Асф. факт.$ – теоретическое и полученное фактическое значение асферичности от ближайшей сферы (мкм). $Дельта асф.$ – искомые нормальные отклонения асферической поверхности от теоретической (мкм). В последней графе $Попр. деф.$ – поправка в показаниях сферометра (мкм), учитывающая деформации сферометра при наклонном его положении относительно рабочей поверхности. Данная поправка определяется экспериментально для раз-

личных углов наклона сферометра α (рис. 4) относительно вертикального положения. Учет данной деформационной поправки значительно повышает точность измерений.

Для снижения погрешности измерений:

- измерения выполняются от эталонной сферической поверхности с измеренным радиусом кривизны;
- измерения повторяются несколько раз в каждом положении и усредняются;
- измерения выполняются в нескольких диаметральных сечениях на поверхности детали;
- измерения выполняются набором сферометров с разной базой;
- все измерения выполняются с учетом поправки за счет деформаций сферометра при наклонном расположении на поверхности измеряемой детали. Без учета данной погрешности ошибка в описываемом случае может достигать 50 мкм (!)

Суммарная погрешность определения профиля определяется суммой погрешностей каждого измерения. Если каждое измерение выполнено с точностью 1 мкм, то в рассматриваемом случае (18 стоянок) суммарная максимальная и наименее вероятная погрешность будет составлять 18 мкм, если погрешность измерений 0.2 мкм, то суммарная погрешность определения профиля меньше 4 мкм.

На рис. 6 приведен усредненный профиль и отклонения составляют около 6 мкм. Отклонения фактические включают астигматизм, асимметрию и другие остаточные ошибки. Поэтому после предварительной полировки поверхности был выполнен интерферометрический контроль с CGH – корректором и получены подтверждающие результаты.

Фактические измерения вершинного радиуса поверхности дали величину $R_0 = 14639 \pm 5$ мм (требуемое значение ± 7 мм), что составляет величину отклонения от заданного значения 0,03 %. Ошибка формы поверхности составила 16 мкм. Интерферограмма волнового фронта после предварительной полировки поверхности зеркала представлена на рис. 7.

Следует особо отметить, что после контроля сферометром и предварительной полировки контроль осуществлен и ИК-интерферометром с корректором и CGH-корректором в видимом диапазоне [11]. И ИК-корректор, фактически, не понадобился. Таким же образом выполнялась асферизация зеркала проекта TNT (*Thai National telescope, Australia – Thailand*) диаметром 2400 мм с асферичностью в 160 мкм, а также ряд других крупных проектов изготовления главных и вторичных зеркал.

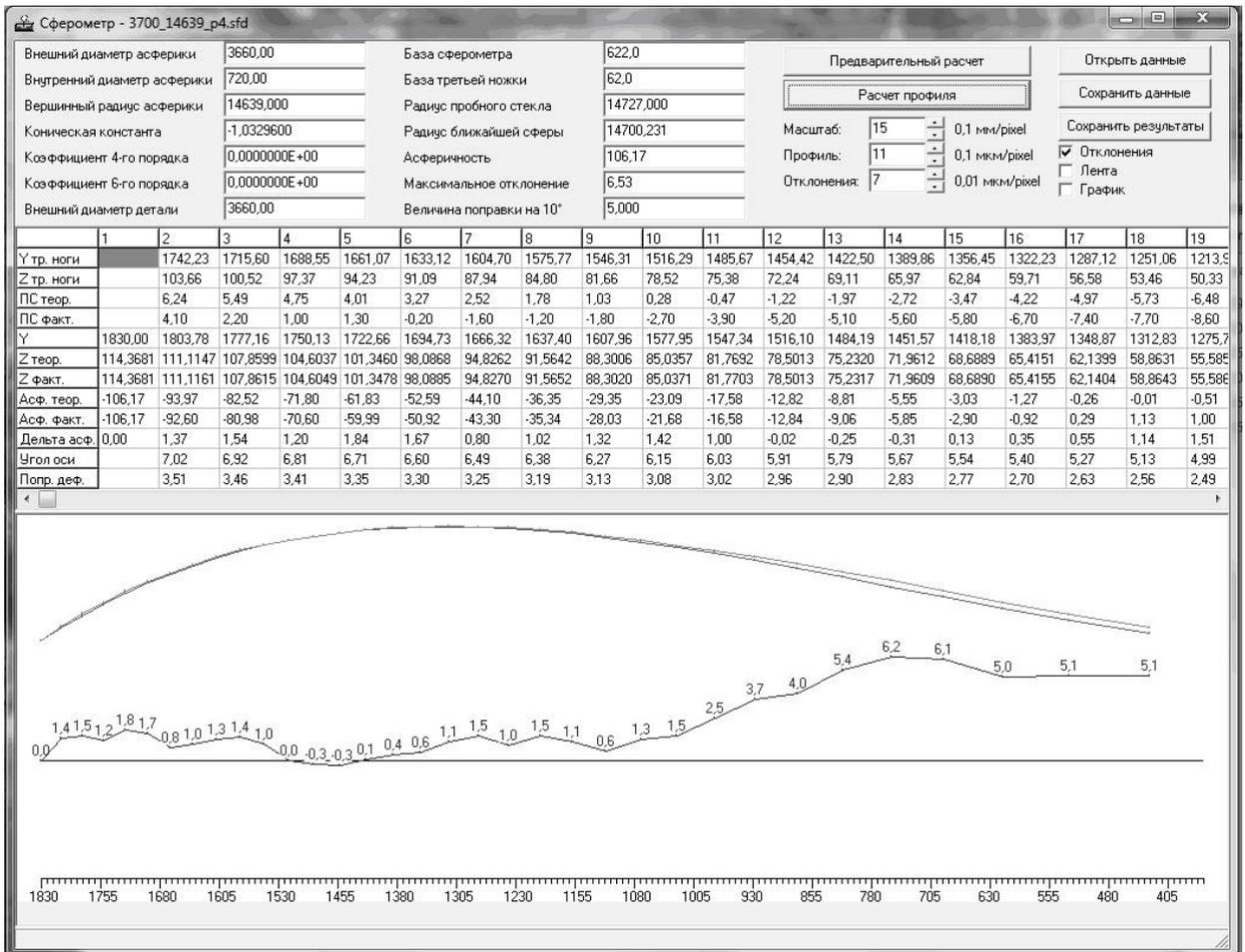


Рис. 6. Результаты расчета профиля асферической поверхности

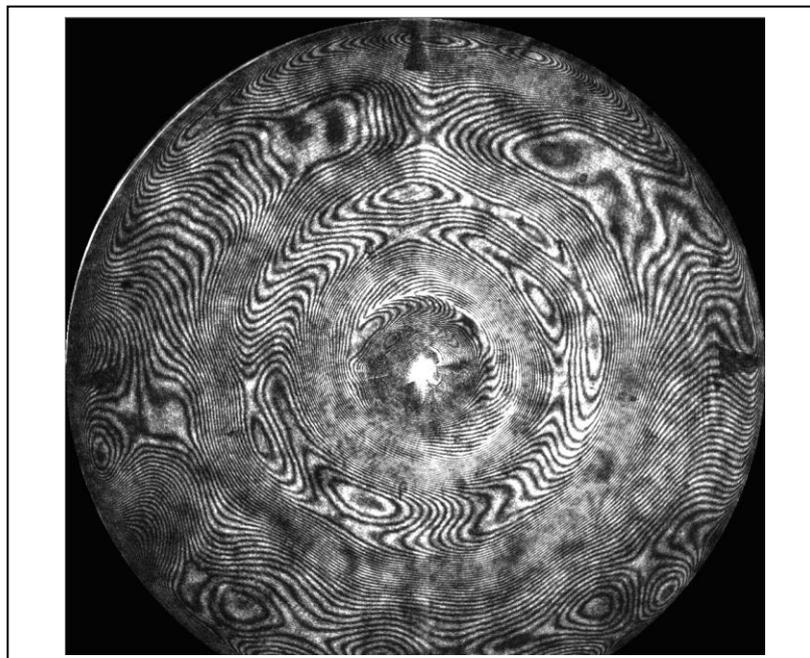


Рис. 7. Интерферограмма волнового фронта после предварительной полировки поверхности зеркала

Результаты, приведенные на рис. 6 и 7, показывают высокую эффективность и надежность предложенного метода измерения профиля шлифованной асферической поверхности и практически подтверждают достижение технического результата: построение абсолютного профиля отклонений формы асферической поверхности оптической детали от требуемой теоретической с необходимой точностью (отклонение вершинного радиуса от заданного менее 0,03-0,05 %) и достижение данного значения вершинного радиуса в процессе формообразования.

Заключение

В предложенном методе измерения профиля асферической поверхности при перпендикулярном его расположении диаметральному сечению и последовательном перемещении его от центра к краю удается получить подробный профиль абсолютных отклонений асферической поверхности от требуемой с точностью в 5-10 мкм и получить требуемый вершинный радиус с точностью менее 0.03-0.05 % от заданного. Успешная реализация метода была показана при асферизации зеркал по проектам VST, TNT, VISTA, DOT ARIES и др.

Список литературы

1. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V.* Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects)// Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8450. P. 84504T.
2. *Burge J.H.* Measurement of large convex aspheres// Proceedings of SPIE. 1996. V. 2871. P.362-373 (1996).
3. *Smith B.K., Burge J.H. and Martin H.M.* Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes// Proceedings of SPIE. 1997. V.3134. P. 51-61.
4. *Burge J. H., Su P., Zhao C.* Optical metrology for very large convex aspheres// Proceedings of SPIE. 2008. V.7018. P.701818-1 - 701818-12.
5. *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// Proceedings of SPIE. 2010. V.7739. P.773907.
6. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Romyantsev V.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A.* Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST// Proceedings of SPIE. 2001. V.4451. P.131-137.
7. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya*

V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A. Manufacturing of secondary mirrors from Sital CO-115M for European projects TTL, NOA and VST// Proceedings of SPIE. 2001. V.4451. P.138-144.

8. Henselmans R., Rosielle, P.C.J.N., Steinbuch, M., Saunders, I.J. Nanometer Accuracy Noncontact Measurement of Freeform Optical Surfaces// 2005. Philips Precision Technology Conference. P.117 – 121.

9. Bely P. Y. The Design and Construction of Large Optical Telescopes// 2002. Springer. P.167 .

10. 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// Proceedings of SPIE. 2012. V.8450. P.84504R.

11. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Semenov A.P. Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors// Proceedings of SPIE. 2010. V.7739. P.77390P.

Method of definition of the profile of the polished aspherical surface of large-size astronomical mirrors

Abdulkadyrov M.A., Patrikeev V.E., Semenov A.P.

laastro@lzos.ru

JSC "Lytkarino Optical Glass Factory" Lytkarino, Moscow Region

Key words: telescopes, astronomical mirrors, control of an aspherical polished surface of a mirror, linear spherometer.

Is described the method of definition of an absolute profile polished aspherical surface of large-size astronomical mirrors using linear three-point spectrometer, sequentially moved perpendicular to the direction from the center to the edge of a detail.. The method of determining of an apical radius is described. Are given examples of successful use of a method at production of mirrors of telescopes VST (VLT Survey Telescope), TNT (Thai National Telescope), VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy), DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope for Aryabhata Research Institute of Observational Sciences), etc.

References

1. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V. Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects)// Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8450. P. 84504T.
2. Burge J.H. Measurement of large convex aspheres// Proceedings of SPIE. 1996. V. 2871. P.362-373 (1996).
3. Smith B.K., Burge J.H. and Martin H.M. Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes// Proceedings of SPIE. 1997. V.3134. P. 51-61.
4. Burge J. H., Su P., Zhao C. Optical metrology for very large convex aspheres// Proceedings of SPIE. 2008. V.7018. P.701818-1 - 701818-12.
5. 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// Proceedings of SPIE. 2010. V.7739. P.773907.

6. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A. Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST// Proceedings of SPIE. 2001. V.4451. P.131-137.
7. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A. Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST// Proceedings of SPIE. 2001. V.4451. P.138-144.
8. Henselmans R., Rosielle, P.C.J.N., Steinbuch, M., Saunders, I.J. Nanometer Accuracy Noncontact Measurement of Freeform Optical Surfaces// 2005. Philips Precision Technology Conference. P.117 – 121.
9. Bely P. Y. The Design and Construction of Large Optical Telescopes// 2002. Springer. P.167 .
10. 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// Proceedings of SPIE. 2012. V.8450. P.84504R.
11. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Semenov A.P. Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors// Proceedings of SPIE. 2010. V.7739. P.77390P.