

Перспективные методы контроля качества выпуклых асферических зеркал большого диаметра

12, декабрь 2013

DOI: 10.7463/1213.0645432

Батшев В. И., Бадунова Е. А., Польщикова О. В.

УДК 681.2.083

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

batshev.vlad@gmail.com

elenabadunova@yandex.ru

polschikova@gmail.com

Введение

Астрономические исследования играют огромную роль в формировании научной картины мира и в познании Вселенной. В последние десятилетия астрономическая наука испытывает стремительный подъем и вызывает все больший интерес в научном мире, о чем свидетельствует, например, тот факт, что 2009 год был назван международным годом астрономии.

Интенсивное развитие оптического приборостроения создает предпосылки научных открытий, что можно объяснить глубоким усовершенствованием классических телескопов и созданием принципиально новых оптических систем. Усовершенствование традиционных оптических систем часто приводит к тому, что некоторые их оптические характеристики переходят в разряд экстремальных. Например, увеличиваются диаметры входных зрачков телескопов, апертурные углы зеркал, угловые поля и др.

За последнее несколько лет в мире введены в эксплуатацию десятки крупных телескопов, среди которых многие имеют диаметры главных зеркал 8...10 м. Тенденция создания все более крупных инструментов особенно четко прослеживается в последние десятилетия. Главной проблемой создания крупных телескопов является обеспечение качества изображения, что в свою очередь требует разработки высококачественных и высокоточных методов контроля формы

асферических зеркал. Задачей этих методов является построение топологической карты отклонений формы изготовленного зеркала от теоретической формы.

Большинство разработанных методов контроля относится к вогнутым асферическим поверхностям, для которых наиболее успешно применяются компенсационный и голографический методы. Наиболее трудно разрешимой проблемой контроля формы асферических зеркал является контроль именно выпуклых поверхностей, т.к. для ее решения возникает необходимость использовать вспомогательные оптические элементы, диаметры которых в несколько раз превышают диаметр самой контролируемой поверхности.

В таблице 1 приведены параметры крупнейших выпуклых зеркал современных действующих и проектируемых телескопов.

Таблица 1.

Крупнейшие выпуклые зеркала современных телескопов

Телескоп	Форма поверхности	Диаметр D , м	Вершинный радиус r_0 , мм	Коническая константа k	Угол наклона крайней нормали $\varphi_{кр}$
<i>E-ELT</i>	Гиперболоид	4,50	14488,0	-2,564187	0,170
<i>LSST</i>	Эллипсоид	3,42	6693,00	-0,1185	0,257
<i>TMT</i>	Гиперболоид	3,05	6227,68	-1,318228	0,238
<i>VISTA</i>	Гиперболоид	1,24	4018,81	-5,548792	0,146
<i>MMT</i>	Гиперболоид	1,20	3690,00	-3,373	0,156
<i>VLT</i>	Гиперболоид	1,12	4553,57	-1,66926	0,122
«Миллиметронтон»	Гиперболоид	0,60	275,00	-1,147277	0,788

Основной целью настоящего документа является обзор новых подходов к решению задачи контроля выпуклых асферических зеркал, не требующих применения крупногабаритных вспомогательных оптических элементов.

Рассматриваемые здесь методы основаны на принципиально новой, не применяемой до настоящего времени, схеме освещения контролируемой поверхности (КП) – схеме ортогональных лучей.

1. Базовая схема ортогональных лучей

Схема ортогональных лучей впервые предложена профессором Пуряевым Д.Т. в 1982 г. в виде изобретения [1], предметом которого является способ измерения и контроля профиля оптических поверхностей.

В общем случае для схемы ортогональных лучей справедливы следующие геометрические соотношения (рис. 1):

- 1) луч, отраженный от КП распространяется под углом 2φ к оси OY , где φ – угол наклона нормали к точке падения луча;
- 2) если КП имеет форму сферы или асферической поверхности второго порядка, то высота h отраженного луча в плоскости анализа (ПА) связана со стрелкой прогиба z КП соотношением

$$h \approx 3z. \quad (1)$$

Структура пучка, отраженного от КП, несет в себе информацию о форме и качестве поверхности. Анализ структуры отраженного пучка может проводиться разными методами, например, интерференционным методом [2-5] или модифицированным методом Гартмана [6].

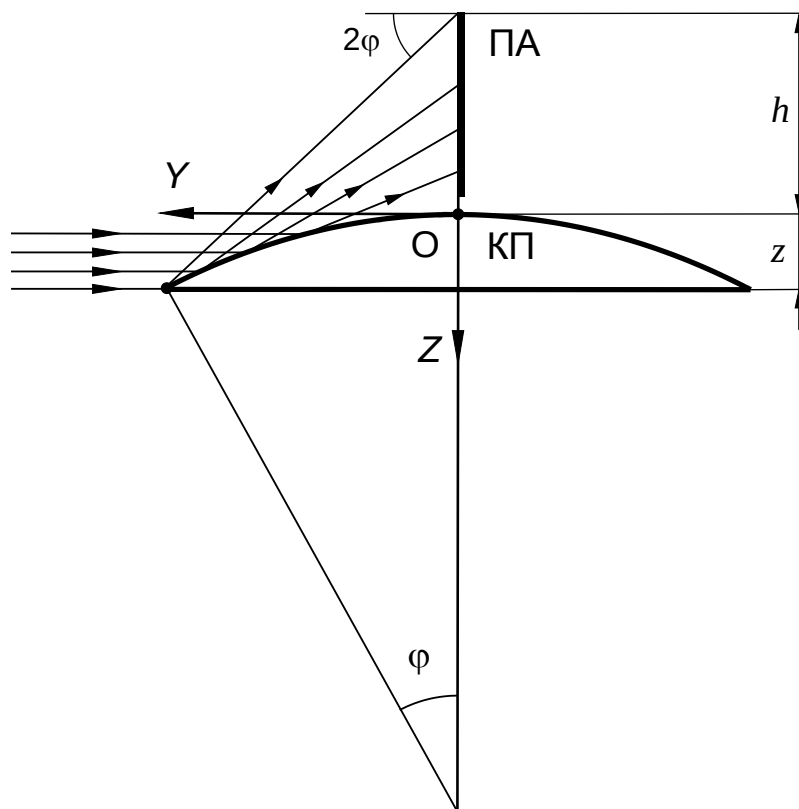


Рис. 1. Схема ортогональных лучей

Соотношение (1) определяет габариты анализатора отраженного волнового фронта. Как показывают расчеты, даже для самого крупного зеркала – вторичного зеркала телескопа E-ELT – высота анализатора волнового фронта не превышает 1,2 м. Следовательно, схема ортогональных лучей не требует применения вспомогательных крупногабаритных оптических деталей и является очень перспективной для создания новых методов контроля.

К недостатку схемы следует отнести то, что одновременно контролируется лишь профиль зеркала, а не целиком вся его поверхность; топографическая карта всего зеркала получается путем «сшивания» множества профилей. Этим обуславливается большое время контроля, а также возможность появления погрешностей, обусловленных поворотом измерительного устройства вокруг оси симметрии КП.

Рассмотрим подробно возможные методы анализа волнового фронта, отраженного от КП.

2. Интерференционный метод

Рис. 2 иллюстрирует сущность интерференционного метода контроля, описанного в работах [2-3], [6] и основанного на базовой схеме ортогональных лучей. Метод применим для контроля, как сферических, так и асферических поверхностей. Исследуемая поверхность с вершиной в точке O освещается пучком параллельных лучей, распространяющихся перпендикулярно оптической оси зеркала (оси OZ). Интерференционная картина, локализованная всюду, образуется при взаимодействии двух волновых фронтов, один из которых (обозначен цифрой 2) направляется в ПА после отражения от контролируемой поверхности, а другой (обозначен цифрой 1), минуя ее.

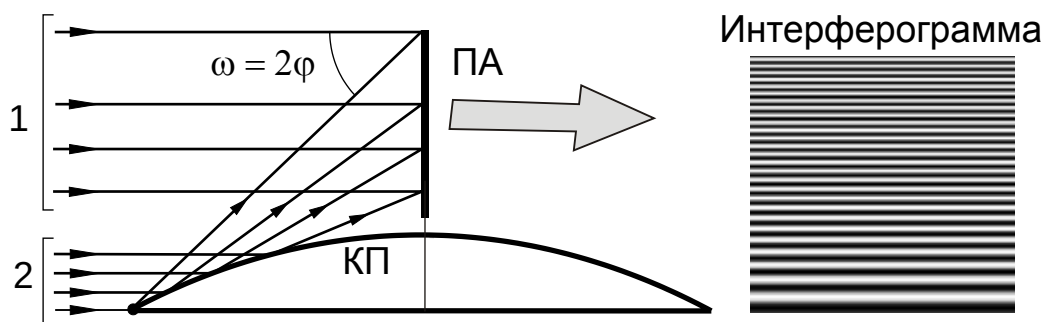


Рис. 2. Схема интерференционного метода контроля

Анализ интерференционной картины производится в плоскости, перпендикулярной первоначальному направлению пучка лучей, и позволяет контролировать форму и геометрические параметры меридионального профиля поверхности. Вид интерферограммы уникален для каждой КП, но всегда интерферограмма представляет собой разнотолщинные дуги, причем наибольшей шириной обладает первая дуга, ближайшая к вершине зеркала. Радиус кривизны интерференционных дуг настолько велик, что дуги можно считать полосами.

Ширина регистрируемых интерференционных полос определяется по известной [7, 8] формуле

$$b = \lambda / \sin \omega, \quad (2)$$

где ω – угол между интерферирующими лучами, равный

$$\omega = 2\varphi. \quad (3)$$

Анализ формул (2) и (3) показывает, что при контроле высокоапертурных зеркал ширина полос на краю интерференционной картины весьма мала, что существенно затрудняет их регистрацию существующими в настоящее время матричными приемниками. Например, при использовании в качестве источника излучения гелий-неонового лазера с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм для контроля формы выпуклого зеркала телескопа *LSST*, у которого угол наклона крайней нормали к оси симметрии зеркала составляет $\varphi_{\text{кр}} = 0,257$, ширина крайних интерференционных полос не превышает 1,3 мкм.

Переход в инфракрасный диапазон приводит к увеличению ширины полос, но не решает проблему, т.к. размер чувствительных элементов у существующих в настоящее время приемников, работающих в инфракрасном диапазоне спектра, существенно больше, чем у приемников для видимого диапазона.

Решить эту проблему можно, например, регистрируя интерферограмму через микрообъектив. Однако при этом потребуется прецизионная система вертикального перемещения последнего (рис. 3).

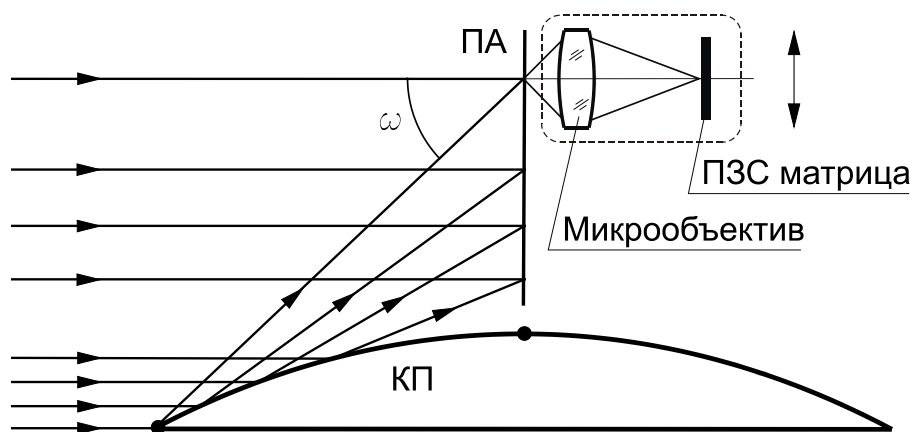


Рис. 3. Схема регистрации интерферограммы с помощью микрообъектива

2. Модифицированный метод Гартмана

Другой метод контроля, не требующий регистрации полос малой ширины, представляет собой модифицированный метод Гартмана. Он основан на анализе взаимного расположения центров световых пятен, которые образуются узкими пучками лучей, отраженными от КП. Схема метода показана на рис. 4. На КП с помощью направляется пучок параллельных лучей, ограниченный диафрагмой Д с линейным расположением отверстий, выделяющих узкие пучки лучей аналогично классическому методу Гартмана. Лучи, проходящие через отверстия диафрагмы, отражаются от КП и образуют в ПА так называемую гартманограмму в виде ряда световых пятен. При измерении координат центров пятен на основании известных геометрических параметров схемы контроля можно определить отклонение формы исследуемой поверхности от теоретического вида. Перемещение диафрагмы Д вдоль оси ОZ позволяет сканировать весь контролируемый профиль во избежание пропуска местных погрешностей.

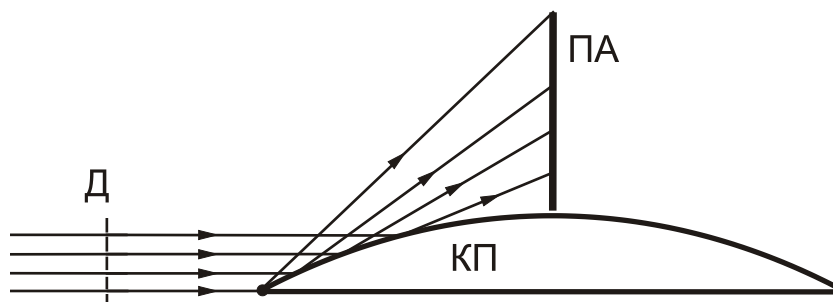


Рис. 4. Схема контроля формы зеркала модифицированным методом Гартмана

В нижней строке таблицы 1 приведены параметры вторичного гиперболического зеркала радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон» [9]. Это зеркало обладает сравнительно небольшим диаметром, но очень высокой апертурой – угол наклона крайней нормали превосходит 45° . Это значит, что при освещении его по схеме ортогональных лучей луч, идущий в край зеркала, после отражения не пересечет ПА, а пойдет практически параллельно оси симметрии зеркала. Для контроля подобных зеркал предлагается иначе расположить ПА, как показано на рис. 5. Кроме того, предлагается заменить диафрагму Гартмана пентапризмой, с помощью которой осуществляется сканирование профиля КП узким лазерным пучком. При этом нет необходимости в использовании коллиматора,

<http://technomag.bmstu.ru/doc/645432.html>

размеры которого могут быть значительными для таких высокоапертурных зеркал. Применение пентапризмы обусловлено также тем, что погрешности ее положения, возникающие при перемещении, не влияют на угол отклонения лазерного пучка. Он всегда равен удвоенному углу между отражающими гранями пентапризмы и не зависит от ее положения.

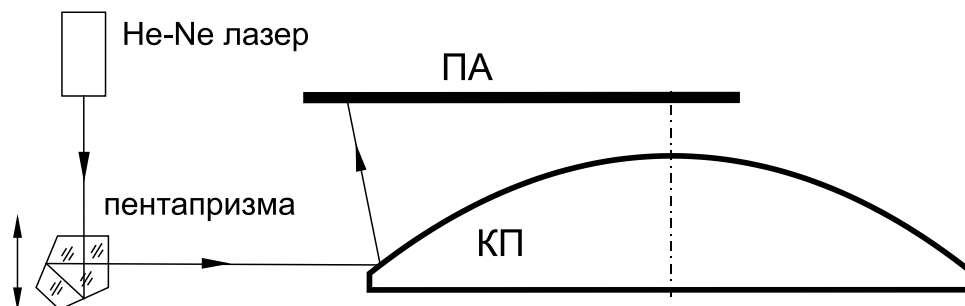


Рис. 5. Схема контроля формы высокоапертурного зеркала

Заключение

Рассмотренные в статье методы контроля формы выпуклых асферических зеркал, в отличие от традиционных методов, просты в реализации и не требуют больших экономических затрат, связанных с изготовлением вспомогательных оптических систем. Поэтому они являются очень перспективными для применения при изготовлении крупных оптических и радиотелескопов.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (договор № 14.124.13.5457-МК).

Список литературы:

1. Пуряев Д.Т. Способ измерения профиля оптических поверхностей: а.с. 1044969 СССР. 1983. Бюл. № 36. 3 с.
2. Дружин В.В., Пуряев Д.Т. Интерференционный метод измерения геометрических параметров выпуклых асферических зеркал крупных оптических телескопов // Оптика-2007: МНТК: тез. докл. Т. 3. СПб., 2007. С. 312.

3. Дружин В.В., Пуряев Д.Т. Интерференционный метод для контроля профиля выпуклых асферических зеркал // Прикладная оптика-2008: МНТК тез. докл. Т. 1. СПб., 2008. С. 214-218.
4. Goncharov A.V., Druzhin V.V., Batshev V.I. Non-contact methods for optical testing of convex aspheric mirrors for future large telescopes // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7389. P. 73891A.
5. Druzhin V.V., Batshev V.I. New methods for optical testing of large convex aspheric astronomical mirrors // Proc. IONS-8. Moscow, 2010. P. 34-35.
6. Дружин В.В., Пуряев Д.Т. Метод Гартмана для контроля формы выпуклых асферических зеркал крупных оптических телескопов // Оптический журнал. 2007. Т. 74, № 12. С. 4-7.
7. Захарьевский А.Н. Интерферометры. М.: ГИОП, 1952. 296 с.
8. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
9. Spyromilio J. The European Extremely Large Telescope: the Arne way // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6986. P. 698605-01.
10. Hobby – Eberly Telescope // Website of the University of Texas at Austin. Available at: <http://www.as.utexas.edu/mcdonald/het/het.html> , accessed 11.09.2013.
11. Armagh Observatory. Southern African Large Telescope // Website of Armagh Observatory. Available at: <http://star.arm.ac.uk/SALT/> , accessed 11.09.2013.
12. Johns M. The Giant Magellan Telescope // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6986. 12 p.
13. Large Synoptic Survey Telescope: website. Available at: <http://www.lsst.org> , accessed 11.09.2013.
14. Website of W.M. Keck Observatory. Available at: <http://keckobservatory.org> , accessed 11.09.2013.
15. Thirty Meter Telescope: website. Available at: <http://www.tmt.org> , accessed 11.09.2013.
16. Gran Telescopio Canarias : website. Available at: <http://www.gtc.iac.es> , accessed 11.09.2013.

17. Large Binocular Telescope // Website of Large Binocular Telescope Observatory.
Available at: <http://lbtwww.arcetri.astro.it> , accessed 11.09.2013.
18. Very Large Telescope Information // Website of the European South Observatory.
Available at: <http://www.eso.org/public/teles-instr/vlt/index.html> , accessed 11.09.2013.

Promising methods for quality control test of large convex aspherical mirrors

12, December 2013

DOI: 10.7463/1213.0645432

Batshev V.I, Badunova E.A., Pol'schikova O.V.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

batshev.vlad@gmail.comelenabadunova@yandex.rupolschikova@gmail.com

Promising methods for quality control test of large convex aspherical mirrors were considered in this article. These methods are based on a new scheme of illuminating the mirror under control by a parallel multiple-beam where the beams are perpendicular to the mirror's symmetry axis. The main advantage of such methods is that they don't require auxiliary large-size optical elements. A new non-interferometric method for a quality control test of convex aspherical mirrors with high aperture (angle between the optical axis and the marginal normal to the mirror is more than 45 degrees) was developed on the basis of the specified illuminating scheme.

Publications with keywords: [control](#), [interference](#), [aspherical mirror](#), [telescope](#), [Hatmann test](#)

Publications with words: [control](#), [interference](#), [aspherical mirror](#), [telescope](#), [Hatmann test](#)

References

1. Puryaev D.T. *Sposob izmereniya profilya opticheskikh poverkhnostey* [Method for measuring profile of optical surfaces]. Author's certificate USSR no. 1044969, 1983.
2. Druzhin V.V., Puryaev D.T. Interferentsionnyy metod izmereniya geometricheskikh parametrov vypuklykh asfericheskikh zerkal krupnykh opticheskikh teleskopov [Interferometric method for measuring geometric parameters of convex aspherical mirrors of large optical telescopes]. *Optika- 2007: MNTK: tez. dokl.* [Applied Optics - 2007: Youth Scientific and Technical Conf.: abstr.]. Vol. 3. St. Petersburg, 2007, p. 312.
3. Druzhin V.V., Puryaev D.T. Interferentsionnyy metod dlya kontrolya profilya vypuklykh asfericheskikh rkal [Interferometric method for profile testing large convex

- aspherical mirrors]. *Prikladnaya optika-2008: MNTK : tez. dokl.* [Optics - 2008: Youth Scientific and Technical Conf.: abstr.]. Vol. 1. St. Petersburg, 2008, pp. 214-218.
4. Goncharov A.V., Druzhin V.V., Batshev V.I. Non-contact methods for optical testing of convex aspheric mirrors for future large telescopes. *Proc. SPIE*, 2009, vol. 7389, p. 73891A.
 5. Druzhin V.V., Batshev V.I. New methods for optical testing of large convex aspheric astronomical mirrors. *Proc. IONS-8*, Moscow, 2010, pp. 34-35.
 6. Druzhin V.V., Puryaev D.T. Metod Gartmana dlya kontrolya formy vypuklykh asfericheskikh zerkal krupnykh opticheskikh teleskopov [Mirror-lens compensation systems for monitoring the shape of the primary mirrors of optical telescopes]. *Opticheskiy zhurnal*, 2007, vol. 74, no. 12, pp. 4-7. (English translation: *Journal of Optical Technology*, 2007, vol. 74, no. 12, pp. 794-796. DOI: 10.1364/JOT.74.000794).
 7. Zakhar'evskiy A.N. *Interferometry* [Interferometers]. Moscow, GIOP Publ., 1952. 296 p.
 8. Kolomiitsev Yu.V. *Interferometry* [Interferometers]. Leningrad, Mashinostroenie, 1976. 296 p.
 9. Spyromilio J. The European Extremely Large Telescope: the Arne way. *Proc. SPIE*, 2008, vol. 6986, p. 698605-01.
 10. *Hobby – Eberly Telescope*. Website of the University of Texas at Austin. Available at: <http://www.as.utexas.edu/mcdonald/het/het.html> , accessed 11.09.2013.
 11. *Armagh Observatory. Southern African Large Telescope*. Website of Armagh Observatory. Available at: <http://star.arm.ac.uk/SALT/> , accessed 11.09.2013.
 12. Johns M. The Giant Magellan Telescope. *Proc. SPIE*, 2008, vol. 6986, 12 p.
 13. *Large Synoptic Survey Telescope*: website. Available at: <http://www.lsst.org> , accessed 11.09.2013.
 14. *W. M. Keck Observatory* : website. Available at: <http://keckobservatory.org> , accessed 11.09.2013.
 15. *Thirty Meter Telescope*: website. Available at: <http://www.tmt.org> , accessed 11.09.2013.
 16. *Gran Telescopio Canarias*: website. Available at: <http://www.gtc.iac.es> , accessed 11.09.2013.
 17. *Large Binocular Telescope*. Website of Large Binocular Telescope Observatory. Available at: <http://lbtwww.arcetri.astro.it> , accessed 11.09.2013.
 18. *Very Large Telescope Information*. Website of the European South Observatory. Available at: <http://www.eso.org/public/teles-instr/vlt/index.html> , accessed 11.09.2013.