

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЫПУКЛЫХ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Д.И. Краснов

С.Ч. Нгуен

В.В. Дружин

mr.dimonkras@mail.ru

chiennx.htbm@gmail.com

druzhin@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Интерференционные методы контроля позволяют с высокой точностью оценить погрешности формы профиля поверхности оптических деталей. Обработка интерференционной картины позволяет получить карту отклонений поверхности в каждой ее точке с точностью до половины длины волны. Предложен интерференционный метод контроля выпуклых гиперболических поверхностей, с помощью которого можно контролировать зеркала с большими апертурными углами в мнимом геометрическом фокусе. Предлагаемая автоколлимационная схема контроля состоит из гелий-неонового лазера с длиной волны 632,8 нм, менисковой линзы и планарного осесимметричного дифракционного оптического элемента для коррекции сферической аберрации мениска. Приведен численный метод расчета дифракционного оптического элемента с помощью фазового профиля на примере вторичного гиперболического зеркала космического телескопа «Миллиметрон». Проведено моделирование разработанной схемы в программе Zemax OpticStudio. Выполнена оценка погрешности аппроксимации рассчитанного фазового профиля в зависимости от числа фазовых коэффициентов. Предложена оптическая система интерферометра Физо для реализации разработанного метода. Определено влияние погрешности установки контролируемого зеркала на интерференционную картину для осевого смещения, поперечного смещения и наклона. Выполнена оценка остаточной волновой аберрации в системе контроля

Ключевые слова

Интерференционная картина, гиперболическая поверхность, контроль формы, дифракционный элемент, фазовый профиль, интерферометр Физо

Поступила 14.04.2022

Принята 05.07.2022

© Автор(ы), 2022

Введение. В настоящее время существует множество методов контроля асферических поверхностей, которые успешно применяются на практике. Среди них методы контроля поверхностей второго порядка по анаберрационным точкам [1] и методы с компенсационными элементами для контроля поверхностей высших порядков [2]. В оптическом приборостроении используются компенсаторы в виде голографических и дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [3–6]. Такие элементы представляют собой дифракционные решетки с переменным периодом. Дифракционный оптический элемент способен заменить сразу несколько оптических, что позволяет уменьшить погрешности позиционирования компонентов относительно друг друга, однако такой элемент требует высокой точности изготовления.

Несмотря на все многообразие методов контроля, контроль выпуклых гиперболических зеркал с большими апертурными углами в мнимом геометрическом фокусе вызывает существенные трудности, потому что традиционные методы не работают для зеркал такой конфигурации. Варианты решения этой проблемы, направленные на контроль таких зеркал по отдельным зонам, рассмотрены в [7–10], но все они требуют высокоточной механики и полной соосности зеркала и поворотного механизма.

Предлагаемый авторами настоящей работы метод контроля является модификацией метода, рассмотренного в [11, 12]. Модификация заключается в использовании ДОЭ для коррекции aberrаций менисковой линзы, что позволит контролировать сразу всю поверхность зеркала. Принципиальная схема метода приведена на рис. 1.

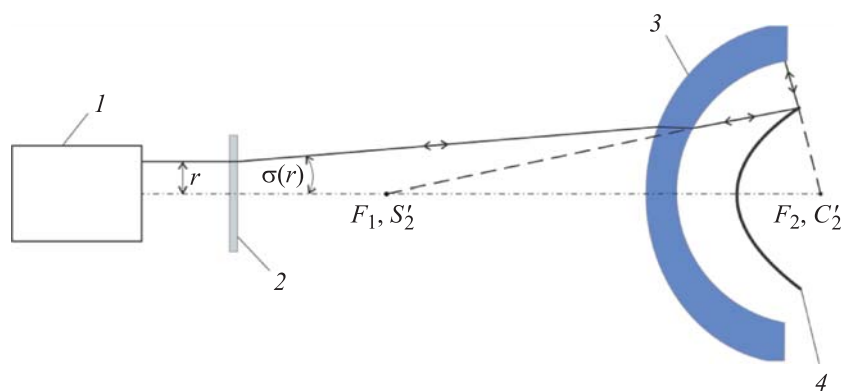


Рис. 1. Принципиальная схема метода контроля поверхности зеркала

Измерительная ветвь лазерного интерферометра 1 состоит из планарного ДОЭ-корректора 2, менисковой линзы 3 и контролируемой поверхности 4. Центр кривизны второй поверхности линзы совпадает с мнимым

геометрическим фокусом зеркала, а мнимое изображение источника после линзы совпадает с действительным фокусом зеркала. Таким образом, в системе образуется автоколлимационный ход лучей с двойным отражением от контролируемой поверхности и двойным прохождением через мениск. Волновой фронт, отраженный от зеркала и искаженный местными ошибками профиля его поверхности, интерферирует с опорным волновым фронтом в плоскости анализа. По интерференционной картине можно восстановить погрешности изготовления контролируемой поверхности.

Разработанный метод использует анаберрационные точки гиперболической поверхности, но ее большой диаметр обуславливает значительную сферическую aberrацию менисковой линзы. Для ее коррекции применяется осесимметричный ДОЭ с переменным периодом, представляющий собой плоскую пластину с кольцевыми зонами. Дифракционный оптический элемент вносит дополнительную разность хода в каждой точке, приводящую к изменению углов преломления лучей.

Цель настоящей работы — анализ разработанного метода контроля и предложенного метода расчета ДОЭ.

Анализ метода расчета ДОЭ. Существуют ДОЭ-корректоры, основанные на использовании принципа Ферма [13]. Однако в этом случае не учитывается набег фазы, появляющийся при преломлении лучей в материале подложки ДОЭ. Предлагаемый метод расчета ДОЭ заключается в определении его фазового профиля по известным конструктивным параметрам системы. Фазовый профиль — это функция, определяющая дополнительный набег фазы, вносимый ДОЭ в каждой точке. Для численного определения функции предлагается выполнить трассировку реальных лучей в обратном ходе для определения угла $\sigma(r)$ как функции координаты r (см. рис. 1). По этим углам можно определить зависимость периода ДОЭ $\Lambda(r)$ для первого порядка дифракции:

$$\Lambda(r) = \frac{\lambda}{\sin(\sigma(r))},$$

где λ — длина волны излучения. От этой функции можно перейти к фазовому профилю:

$$\varphi(r) = 2\pi \int \frac{dr}{\Lambda(r)}. \quad (1)$$

Для проверки правильности вычисления по выражению (1) можно воспользоваться моделированием в программе Zemax OpticStudio с помощью поверхности Binary 2, которая вносит дополнительную разность

фаз в каждой точке. Фазовый профиль такой поверхности задается фазовыми коэффициентами [14]:

$$\varphi(r) = M \sum_{k=1}^N A_{2k} \left(\frac{r}{R} \right)^{2k}, \quad (2)$$

где M — порядок дифракции; A_{2k} — фазовый коэффициент; N — число фазовых коэффициентов; k — номер фазового коэффициента; R — нормировочный радиус.

Проведены моделирование системы контроля для вторичного зеркала телескопа «Миллиметр» и вычисления по выражениям (1) и (2). Функция $\varphi(r)$ приведена на рис. 2, зависимости погрешности аппроксима-

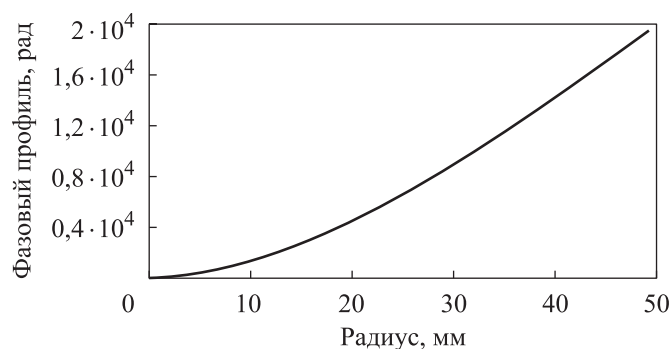


Рис. 2. Фазовый профиль ДОЭ

ции по уравнениям (1) и (2) от числа используемых коэффициентов — на рис. 3. При увеличении числа фазовых коэффициентов возрастает степень приближения фазового профиля к расчетному. Рассчитанный ранее фазовый профиль позволяет перейти к геометрическим параметрам ДОЭ. Радиусы кольцевых зон получаются из решения уравнения $|\varphi(r)| = 2\pi k$, где k — номер кольцевой зоны. Глубина зоны d вычисляется по формуле [15]:

$$d = \lambda / (n - 1),$$

где n — показатель преломления подложки ДОЭ.

Конструктивные параметры схемы контроля в двойном ходе, использованные при моделировании, приведены на рис. 4.

Анализ разработанного метода контроля. В результате моделирования и численного расчета выявили, что восемь и более фазовых коэффициентов обеспечивают идеальный сферический волновой фронт в оптической схеме контроля. При этом увеличение числа коэффициентов приводит к заметному усложнению расчетов.

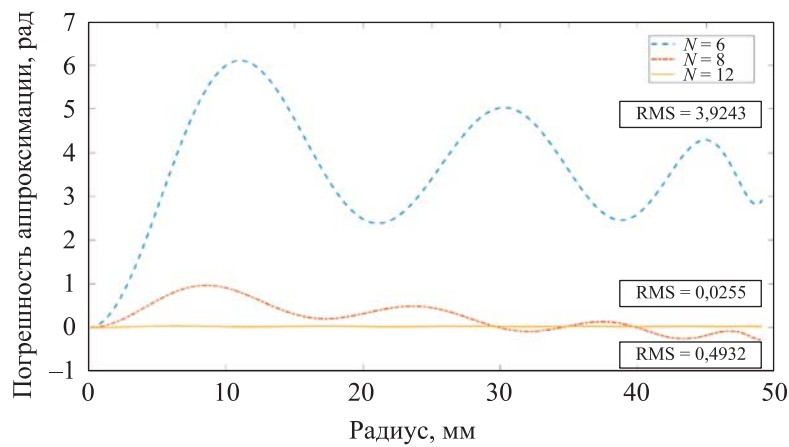


Рис. 3. Погрешность аппроксимации по фазовым коэффициентам для различных чисел N (RMS — среднеквадратическое отклонение)

Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE x 1E-6	Par 0(unused)	Par 1(unused)	Par 2(unused)	Par 3(used)
0 OBJECT	Standard *	Infinity	Infinity			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
1	Standard *	Infinity	100.000			49.475	0.000	49.475	0.000	0.000				
2 STOP (aper)	Standard *	Эталонная	4.000	LZ_KB		49.475	U	0.000	49.475	0.000				
3	Standard *	пластина	Infinity			49.475	0.000	49.475	0.000	0.000				
4	Standard *	ДЦЗ	Infinity	LZ_KB		49.475	0.000	49.475	0.000	-				
5	Binary 2 *	ДЦЗ	Infinity	3420.000		49.475	0.000	49.475	0.000	0.000	1,000	0,000	0,000	0,00
6 [aper]	Standard *	Менчик	355.000	30.000	LZ_KB	272.000	U	0.000	350.000	0.000	-			
7 [aper]	Standard *		340.000	216.980	V	272.000	U	0.000	350.000	0.000	0.000			
8 [aper]	Standard *	Зеркало	254.734	-216.980	P	MIRROR	271.065	U	0.000	271.065	-1.147	0.000		
9 [aper]	Standard *	Менчик	340.000	P	216.980	MIRROR	340.000	U	-	0.000	0.000			
10 [aper]	Standard *	Зеркало	254.734	P	-216.980	MIRROR	271.065	P	0.000	271.065	-1.147	P	0.000	
11 [aper]	Standard *	Менчик	340.000	P	-30.000	P	272.000	U	0.000	350.000	0.000	-		
12 [aper]	Standard *		355.000	P	-3420.000		272.000	U	0.000	350.000	0.000	0.000		
13	Binary 2 *	ДЦЗ	Infinity	6.000	LZ_KB	49.417	0.000	49.417	0.000	-	1,000	0,000	0,000	0,00
14	Standard *	Эталонная	Infinity	-6.000	P	49.417	0.000	49.417	0.000	0.000				
15	Standard *	пластина	Infinity	-4.000	P	49.417	0.000	49.417	0.000	-				
16	Standard *		Infinity	-100.000		49.417	0.000	49.417	0.000	0.000				
17 IMAGE	Standard *		Infinity	-		49.414	0.000	49.414	0.000	0.000				

Рис. 4. Скриншот конструктивных параметров схемы контроля

Интерференционные методы контроля очень чувствительны к погрешностям установки контролируемой детали, поскольку на интерферограмме почти невозможно отличить погрешность установки от погрешности изготовления. Поэтому при контроле данным методом необходима высокоточная установка зеркала с возможностью дальнейшей юстировки. Влияние погрешности установки зеркала на интерференционную картину для трех случаев (дефокусировка, децентрировка и наклон) показано на рис. 5.

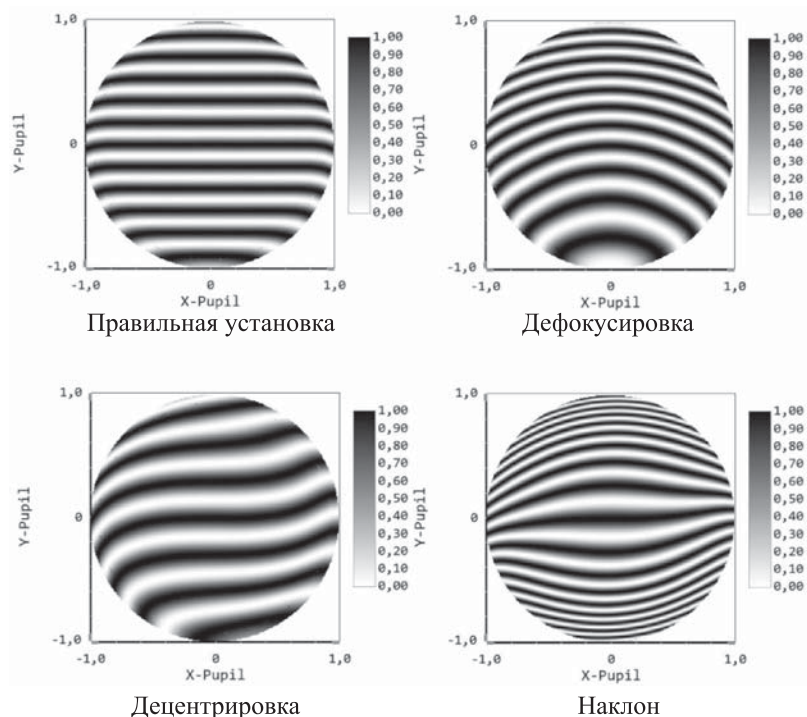


Рис. 5. Влияние погрешности установки на интерференционную картину

Моделирование интерференционной картины показало, что даже незначительное отклонение положения контролируемой поверхности приводит к очень заметным искажениям интерференционной картины. Осевое смещение приводит к симметричному искажению полос, а децентрировка и наклон — к несимметричным искажениям. К аналогичным последствиям приведет неправильная установка мениска, ДОЭ и любых других частей интерферометра. Таким образом, для правильного контроля разработанным методом необходимо обеспечить точное позиционирование всех частей интерферометра и контролируемой поверхности относительно друг друга. На рис. 6 приведены остаточные погрешности волнового фронта — трехмерное представление погрешности и график остаточной волновой сферической аберрации в точке анализа. Остаточная среднеквадратическая погрешность волнового фронта составляет $\lambda / 20$, что позволяет сделать вывод о достаточных коррекционных возможностях ДОЭ.

Описание оптической схемы интерферометра Физо. Для реализации предлагаемого метода контроля можно использовать интерферометр Физо, оптическая схема которого приведена на рис. 7.

Интерферометр состоит из гелий-неонового лазера 1, микрообъектива 2, светоделительного кубика 3, коллимирующего объектива 4, эталонной

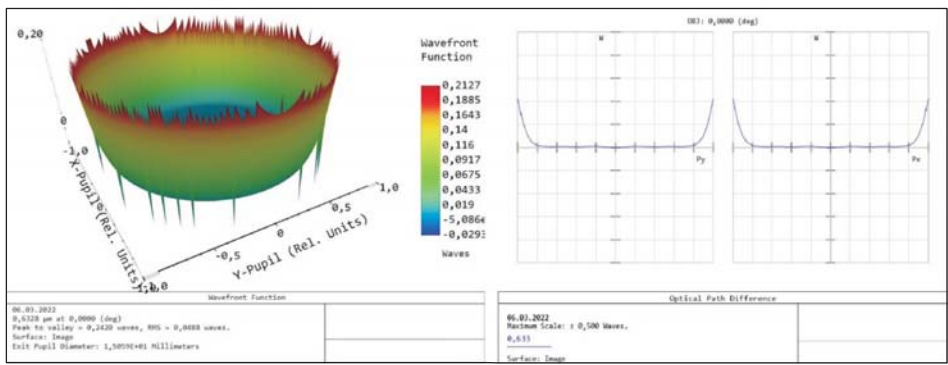


Рис. 6. Остаточные погрешности волнового фронта

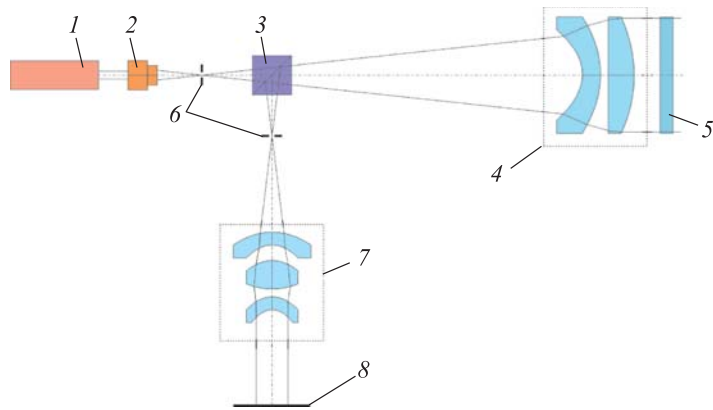


Рис. 7. Принципиальная оптическая схема интерферометра Физо

пластины 5, пространственных фильтров 6, собирающего объектива 7 и матричного приемника излучения 8. Объектный волновой фронт после прохождения эталонной пластинки попадает в измерительную ветвь. Собирающий объектив строит изображение оправы зеркала на матричном приемнике излучения для того, чтобы сопоставить местную погрешность профиля с координатой на зеркале. Путем поворота эталонной пластинки можно развести центры объектного и опорного волновых фронтов и вывести интерференционную картину на полосы. Поскольку в измерительной ветви используется ДОЭ-корректор, неизбежно будут возникать побочные порядки дифракции, которые будут препятствовать процессу измерения. Для решения этой проблемы в фокусе первого порядка можно установить точечную диафрагму, которая будет отрезать все порядки дифракции, кроме первого. Ход лучей в оптической системе измерительной ветви интерферометра показан на рис. 8, а, ход лучей в регистрирующей ветви — на рис. 8, б (штриховая — ход главного луча между оправой зеркала и приемником).

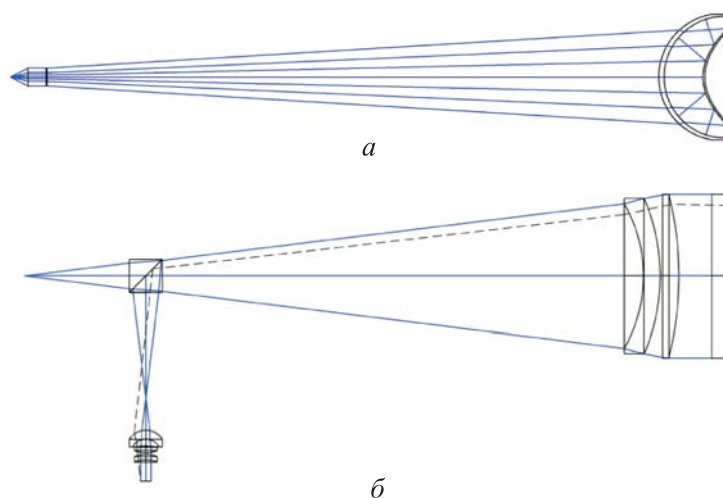


Рис. 8. Ход лучей в измерительной ветви интерферометра (а) и регистрирующей ветви интерферометра (б)

Заключение. Предложенный авторами метод синтеза ДОЭ позволяет с достаточной точностью определить его фазовый профиль, который можно использовать для определения геометрических параметров. Разработанный интерференционный метод позволяет контролировать формы выпуклого гиперболического зеркала с большими апертурными углами в мнимом геометрическом фокусе за одну установку зеркала. Среднеквадратическое отклонение RMS по всей площади апертуры остаточных aberrаций в измерительной ветви не превышает $0,046 \lambda$. Определены искажения интерферограммы, возникающие при неправильной установке контролируемой детали или компонентов интерферометра. Получено минимальное значение периода ДОЭ на краю апертуры $1,729 \text{ мкм}$, что говорит о возможности практической реализации. В настоящее время авторами проводится анализ влияния погрешности изготовления ДОЭ на результаты измерения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Придня В.В. и др. Оптимизация технологии формообразования и методов контроля выпуклых асферических поверхностей крупногабаритных оптических деталей. *Оптический журнал*, 2013, т. 80, № 4, с. 24–32.
- [2] Zhang Y., Chen Q. Testing the large convex aspheric surfaces with aspheric test plate. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9280, art. 928014. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2070918>
- [3] Zhang H., Wang X., Xue D., et al. Modified surface testing method for large convex aspheric surfaces based on diffraction optics. *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, no. 34, pp. 9398–9405. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.56.009398>

- [4] Burge J.H., Su P., Zhao C. Optical metrology for very large convex aspheres. *Proc. SPIE*, 2008, vol. 7018, art. 701818. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.790063>
- [5] Burge J.H. Measurement of large convex aspheres. *Proc. SPIE*, 1997, vol. 2871. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.269059>
- [6] Burge J.H. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics. *Proc. SPIE*, 1995, no. 2576. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.215609>
- [7] Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилов А.Ф. Лазерный интерферометр с асферо-голограммным пробным стеклом для термобарокамеры. *Оптический журнал*, 2017, т. 84, № 3, с. 65–66.
- [8] Goncharov A.V., Druzhin V.V., Batshev V.I. Noncontact methods for optical testing of convex aspheric mirrors for future large telescopes. *Proc. SPIE*, 2009, vol. 7389, art. 73891A. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.827513>
- [9] Капустин А.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. О контроле формы поверхности зеркал радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон». *Контенант*, 2016, т. 15, № 4, с. 67–73.
- [10] Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилов А.Ф. Контроль зеркала контррефлектора телескопа «Миллиметрон» на основе использования синтезированной голограммы. *Фотоника*, 2016, т. 59, № 5, с. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.59.5.44.48>
- [11] Пуряев Д.Т., Дружин В.В., Семенов А.П. и др. Интерферометр для контроля формы выпуклых гиперболоидов. *Контенант*, 2020, т. 19, № 2, с. 6–11.
- [12] Druzhin V., Puryaev D., Semenov A., et al. Interferometer for surface figure of large convex hyperboloid mirrors. *Proc. SPIE*, 2020, vol. 11451, art. 114510V. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2560364>
- [13] Li S., Liu B., Tian A., et al. A practical method for determining the accuracy of computer-generated holograms for off-axis aspheric surfaces. *Opt. Lasers Eng.*, 2016, vol. 77, pp. 154–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.08.009>
- [14] Radiant Zemax. OpticStudio 21. Optical design program. User's manual, 2021. URL: https://www.academia.edu/25361889/ZEMAX_Optical_Design_Program_Users_Manual
- [15] Riedl M.J. Diamond-turned diffractive optical elements for the infrared: suggestion for specification standardization and manufacturing remarks. *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2540. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.219529>

Краснов Дмитрий Игоревич — студент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Нгуен Суан Чиен — студент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Дружин Владислав Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Краснов Д.И., Нгуен С.Ч., Дружин В.В. Интерференционный метод контроля выпуклых гиперболических поверхностей с использованием дифракционного оптического элемента. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2022, № 4 (141), с. 80–91. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-4-80-91>

**INTERFERENCE METHOD IN CONTROLLING
THE CONVEX HYPERBOLIC SURFACES USING
THE OPTICAL DIFFRACTION ELEMENT**

D.I. Krasnov
S.Ch. Nguyen
V.V. Druzhin

mr.dimonkras@mail.ru
chiennx.htbm@gmail.com
druzhin@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Interference control methods are making it possible to evaluate with high accuracy errors in the shape of the optical part surface profile. The interference pattern processing allows obtaining a map of the surface deviations at each of its points with an accuracy of half the wavelength. An interference method is proposed for testing the convex hyperbolic surfaces, which could be introduced to control mirrors with large aperture angles in the imaginary geometric focus. The proposed auto-collimation control scheme consists of a helium-neon laser with the wavelength of 632.8 nm, a meniscus lens and a planar axisymmetric diffractive optical element to correct the meniscus spherical aberration. Numerical method is presented for calculating the optical diffraction element using a phase profile on the example of the secondary hyperbolic mirror of the Millimetron space telescope. The developed scheme was simulated in the Zemax OpticStudio program. The approximation error of the calculated phase profile was evaluated depending on the number of phase coefficients. The Fizeau interferometer optical system is proposed to implement the developed method.

Keywords

Interference pattern, hyperbolic surface, shape control, diffraction element, phase profile, Fizeau interferometer

The influence of errors in installing a controlled mirror on the interference pattern for axial displacement, transverse displacement and tilt was determined. The residual wave aberration was evaluated in the control system

Received 14.04.2022

Accepted 05.07.2022

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Pridnya V.V., et al. Optimizing the shaping technology and test methods for convex aspheric surfaces of large optical items. *J. Opt. Technol.*, 2013, vol. 80, no. 4, pp. 219–225. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000219>
- [2] Zhang Y., Chen Q. Testing the large convex aspheric surfaces with aspheric test plate. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9280, art. 928014. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2070918>
- [3] Zhang H., Wang X., Xue D., et al. Modified surface testing method for large convex aspheric surfaces based on diffraction optics. *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, no. 34, pp. 9398–9405. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.56.009398>
- [4] Burge J.H., Su P., Zhao C. Optical metrology for very large convex aspheres. *Proc. SPIE*, 2008, vol. 7018, art. 701818. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.790063>
- [5] Burge J.H. Measurement of large convex aspheres. *Proc. SPIE*, 1997, vol. 2871. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.269059>
- [6] Burge J.H. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics. *Proc. SPIE*, 1995, no. 2576. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.215609>
- [7] Lukin A.V., Melnikov A.N., Skochilov A.F. Laser interferometer with aspherical holographic test glass for thermal vacuum chamber. *J. Opt. Technol.*, 2017, vol. 84, no. 3, pp. 212–213. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000212>
- [8] Goncharov A.V., Druzhin V.V., Batshev V.I. Noncontact methods for optical testing of convex aspheric mirrors for future large telescopes. *Proc. SPIE*, 2009, vol. 7389, art. 73891A. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.827513>
- [9] Kapustin A.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. On control of mirror surface shape of radiotelescope from “Millimetron” observatory. *Kontenant*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 67–73 (in Russ.).
- [10] Lukin A.V., Melnikov A.N., Skochilov A.F. Measurement of convergent mirror of “Millimetron” telescope using computer-generated hologram. *Fotonika* [Photonics Russia], 2016, vol. 59, no. 5, pp. 44–48 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.59.5.44.48>
- [11] Puryaev D.T., Druzhin V.V., Semenov A.P., et al. Interferometer for convex hyperboloid testing. *Kontenant*, 2020, vol. 19, no. 2, pp. 6–11 (in Russ.).
- [12] Druzhin V., Puryaev D., Semenov A., et al. Interferometer for surface figure of large convex hyperboloid mirrors. *Proc. SPIE*, 2020, vol. 11451, art. 114510V. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2560364>

[13] Li S., Liu B., Tian A., et al. A practical method for determining the accuracy of computer-generated holograms for off-axis aspheric surfaces. *Opt. Lasers Eng.*, 2016, vol. 77, pp. 154–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.08.009>

[14] Radiant Zemax. OpticStudio 21. Optical design program. User's manual, 2021. Available at: https://www.academia.edu/25361889/ZEMAX_Optical_Design_Program_Users_Manual

[15] Riedl M.J. Diamond-turned diffractive optical elements for the infrared: suggestion for specification standardization and manufacturing remarks. *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2540. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.219529>

Krasnov D.I. — Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Nguyen S.Ch. — Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Druzhin V.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Krasnov D.I., Nguyen S.Ch., Druzhin V.V. Interference method in controlling the convex hyperbolic surfaces using the optical diffraction element. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2022, no. 4 (141), pp. 80–91 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-4-80-91>