

КОНТРОЛЬ ЗЕРКАЛА КОНТРРЕФЛЕКТОРА ТЕЛЕСКОПА "МИЛЛИМЕТРОН" НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНТЕЗИРОВАННОЙ ГОЛОГРАММЫ

А.В. Лукин, д.т.н., А.Н. Мельников, к.т.н.,
А.Ф. Скочилов, к.ф.-м.н.,
АО "НПО "Государственный институт прикладной оптики", gipo@telebit.ru, Казань

Космическая обсерватория миллиметрового и ИК-диапазонов длин волн с криогенным телескопом диаметром 10 м "Миллиметрон" ("Спектр-М") планируется к запуску после 2019 года. Рабочий диапазон телескопа от 20 мкм до 17 мм. Разрабатывается технология производства его элементов. В статье предложено контролировать форму выпуклой гиперболической поверхности зеркала контролрефлектора телескопа "Миллиметрон" в цеховых условиях в процессе формообразования и при криогенных температурах в схеме неравноплечевого лазерного интерферометра типа Тваймана-Грина. В качестве оптического компенсатора предполагается использовать синтезированную голограмму, выполненную на плоско-выпуклой подложке из церодура.

Выполнение международного проекта по созданию космической обсерватории "Миллиметрон" (проект "Спектр-М") начатого по инициативе Астрокосмического центра Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук, проходит под научным руководством академика РАН Николая Семеновича Кардашева [1, 2]. На рис.1 представлены общий вид этой космической обсерватории (рис.1а) и принципиальная оптическая схема взаимоположения главного параболического зеркала и гиперболического зеркала контролрефлектора (рис.1б).

Основные геометрические характеристики зеркала контролрефлектора:

- световой диаметр – 542,13 мм;
- форма отражающей поверхности – выпуклый гиперболоид;

MEASUREMENT OF CONVERGENT MIRROR OF MILLIMETRON TELESCOPE USING COMPUTER-GENERATED HOLOGRAM

A.V. Lukin, Doctor of Engineering,
A.N. Melnikov, Candidate of Engineering,
A.F. Skochilov, Candidate of Physics and Mathematics
JSC "NPO "State Institute of Applied Optics",
gipo@telebit.ru, Kazan

Space observatory of millimeter and IR wavelength ranges with cryogenic telescope "Millimetron" ("Spektr-M") with the diameter of 10 m is planned for launch after 2019. Operating range of the telescope is 20 μ m to 17 mm. The production technology of its elements is being developed. In the article it is suggested to measure the shape of convex hyperbolic surface of convergent mirror of Millimetron telescope under the conditions of shop floor in the process of shaping and at cryogenic temperatures in the layout of unequal-arm laser interferometer of Twyman-Green type and use computer-generated hologram executed on plane-convex Zerodur blank in the capacity of optical compensator.

Execution of international project in creation of the space observatory "Millimetron" (project "Spektr-M") initiated by Astro-Space Center of Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences is carried out under the scientific supervision of RAS academician Nikolai Semenovich Kardashev [1, 2]. The general view of this space observatory is given in Fig. 1a and basic optical layout of relative position of the primary parabolic mirror and hyperbolic convergent mirror is given in Fig. 1b.

The main geometric characteristics of convergent mirror:

- optical diameter – 542.13 mm;
- shape of reflective surface – convex hyperboloid;
- equation of the generator of reflective surface:

$$y^2 = 509.4674z + 0.147452z^2.$$

The main geometric characteristics of composite primary mirror:

- optical diameter – 10 m;

- уравнение образующей отражающей поверхности – $y^2=509,4674z+0,147452z^2$.

Основные геометрические характеристики составного главного зеркала:

- световой диаметр – 10 м;
- форма отражающей поверхности – параболоид;
- уравнение образующей отражающей поверхности – $y^2=9600z$.

Важнейшей особенностью работы телескопа этой обсерватории являются криогенные условия (~4К). Это чрезвычайно усложняет как процесс формообразования и контроля рабочих поверхностей зеркал телескопа, так и процесс их аттестации в камерах, имитирующих космические условия по температуре и вакууму. Поэтому при проектировании и изготовлении рабочих поверхностей зеркал необходимо вводить поправки, компенсирующие изменение их формы при переходе от нормальной температуры (щековых условий формообразования) к эксплуатационным криогенным температурам. Последующим важным этапом должна быть экспериментальная проверка корректности введенных поправок.

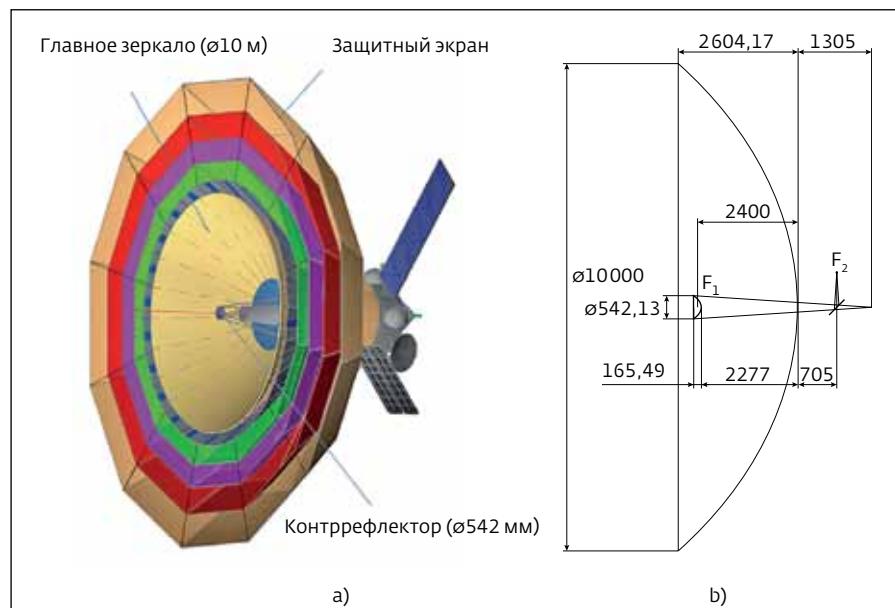


Рис. 1. Космическая обсерватория "Миллиметрон": a) – общий вид; b) – принципиальная оптическая схема взаимоположения главного зеркала и зеркала контуррефлектора

Fig. 1. Space observatory "Millimetron": a) – General view; b) – Basic optical layout of relative position of the primary mirror and convergent mirror

- shape of reflective surface – paraboloid;
- equation of the generator of reflective surface: $y^2=9600z$.

The major peculiarity of telescope operation in this observatory consists in cryogenic conditions (~4K). It extremely complicates the process of shaping and measurement of operating surfaces of telescope mirrors

Ниже предлагается возможный вариант решения этой проблемы в отношении зеркала контроллера на основе использования синтезированной голограммы, выполненной на плоской поверхности плоско-выпуклой подложки из церодура, в качестве оптического компенсатора в схеме неравноплечевого лазерного интерферометра типа Тваймана-Грина [3], представленного на рис.2.

Следует отметить, что эта контрольная схема может быть использована как в производственных условиях для технологического контроля рабочей поверхности зеркала контроллера в процессе ее формообразования, так и для аттестационного контроля этой поверхности в условиях, имитирующих космические по температуре и вакууму.

В этом техническом решении реализуются уникальные свойства церодура – чрезвычайно низкие значения его температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и оптимизация зависимости ТКЛР от температуры [4, 5]. Зависимость ТКЛР церодура от температуры такова, что можно подобрать конкретную его модификацию со значениями ТКЛР, близкими для двух диапазонов температур – в окрестности 4К и 295К. При этом негативные свойства церодура – низкие теплопроводность, модуль упругости, жесткость, коэффициент Максутова [6] – не имеют в данном случае существенного значения.

Разработчики оптической системы обсерватории "Миллиметрон" в качестве материала для зеркала контроллера отдают предпочтение карбиду кремния, так как по коэффициенту Максутова он существенно превосходит все другие материалы, применяемые в космическом телескопостроении, в том числе и церодур.

Выбранный вариант контрольной схемы (см. рис.2) имеет следующие параметры:

- длина волны лазерного источника света $\lambda=632,8$ нм;
- расстояние от "точечного" источника излучения (плоскость диафрагмы 5) до осевой синтезированной голограммы 6 ~3000 мм;
- параметры осевой синтезированной голограммы 6:
 - подложка – плоско-выпуклая;
 - материал – церодур (возможен астросиаталл);
 - световой диаметр 980 мм;
 - радиус кривизны выпуклой поверхности 1300 мм;

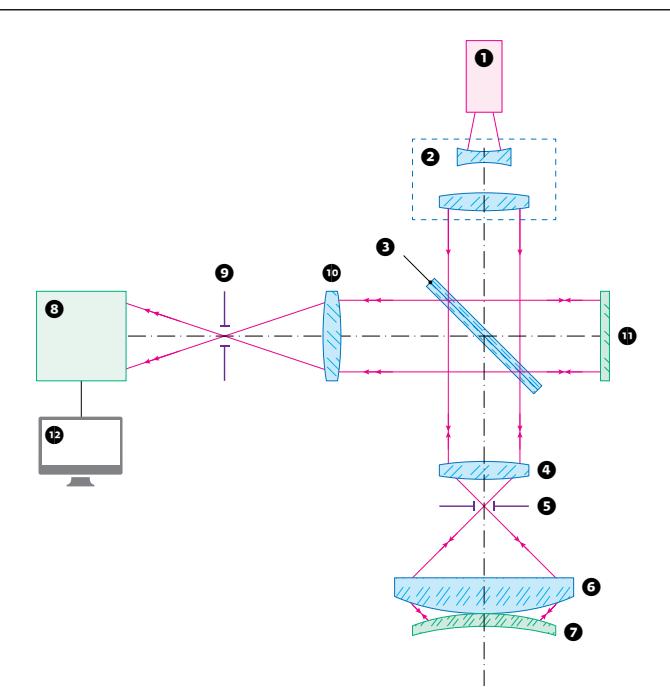


Рис.2. Принципиальная оптическая схема лазерно-голографического контроля зеркала контроллера телескопа "Миллиметрон": 1 – лазер; 2 – расширитель; 3 – светоотделитель; 4, 10 – объективы; 5, 9 – диафрагмы; 6 – осевая синтезированная голограмма; 7 – зеркало контроллера (выпуклый гиперболоид, световой диаметр 542 мм); 11 – плоское опорное зеркало; 8 – телевизионная камера; 12 – персональный компьютер

Fig. 2. Basic optical layout of laser-holographic control of convergent mirror of "Millimetron" telescope: 1 – Laser; 2 – Beam expander; 3 – Beam splitter; 4, 10 – Lenses; 5, 9 – Diaphragms; 6 – On-axis computer-generated hologram; 7 – Convergent mirror (convex hyperboloid, optical diameter 542 mm); 11 – Flat reference mirror; 8 – Television camera; 12 – Personal computer

and attestation process of these operating surfaces in the chambers imitating the space environment by temperature and vacuum. Therefore, during design and fabrication of mirror operating surfaces it is required to introduce modifications compensating the alteration of their shape during the transition from normal temperature (shop floor conditions of shaping) to operating cryogenic temperatures. The following significant stage should include the experimental check of correctness of introduced modifications.

Possible variant of solution of this problem is suggested below in relation to convex convergent mirror on the basis of use of computer-generated hologram executed on plane surface of plane-convex Zerodur blank in the capacity of optical compensator in the layout of unequal-arm laser interferometer of Twyman-Green type [3] shown in Fig. 2.



- дифракционная структура наносится на плоскую поверхность;
- максимальная пространственная частота $v_{\max} = 850 \text{ мм}^{-1}$.

Опыт показывает, что эту контрольную схему целесообразно реализовать в интерферометре с вертикальной ориентацией интерферирующих лучей.

При проведении аттестационного контроля рабочей поверхности зеркала контрапрелектора в термобарокамере, имитирующей космические условия, целесообразно разместить в этой камере лишь синтезированную голограмму 6 и контролируемое зеркало контрапрелектора 7; все остальные элементы интерферометра располагаются вне камеры.

В настоящее время в АО "НПО "Государственный институт прикладной оптики" имеется круговая делительная машина типа МДГ, обеспечивающая изготовление осевых синтезированных голограмм диаметром до 600 мм, и прорабатываются возможные технические решения доведения предельного диаметра осевых синтезированных голограмм до 1000 мм, в том числе и создание новой круговой делительной машины.

It should be noted that this optical testing layout can be used under production conditions for the technological control of convergent mirror operating surface in the process of its shaping and for the attestation control of this surface under the conditions imitating the space environment by temperature and vacuum.

The unique properties of Zerodur are implemented in this technical solution: extremely low values of its coefficient of thermal expansion (CTE) and optimization of CTE dependence on temperature [4, 5]. Dependence of Zerodur CTE on temperature is such that it is possible to select its specific brand with the values of CTE, which are close for two temperature ranges – in the neighborhood of 4K and 295K. At the same time, the negative properties of Zerodur – low heat conductivity, modulus of elasticity, rigidity, Maksutov coefficient [6] – are not significant in this case.

Developers of the optical system of Millimetron observatory give preference to silicon carbide as the material for convergent mirror because it significantly excels all other materials used in space telescope construction, even Zerodur, in Maksutov coefficient.

Selected variant of optical testing layout (see Fig. 2) has the following parameters:



Следует отметить, что создание такой круговой делительной машины актуально и с точки зрения необходимости решения другой важной проблемы телескопостроения – прецизионного лазерно-голографического контроля процесса юстировки двухзеркальных телескопов типа Кассегрена и Ричи-Кретьена [7, 8].

Разумеется, практической реализации предложенного технического решения должны предшествовать натурные исследования на моделях зеркала контроллера диаметром до 200 мм с использованием имеющихся в АО "НПО "Государственный институт прикладной оптики" технологического оборудования и лазерно-голографической измерительной аппаратуры. Это позволит учесть изменение оптических параметров фактически используемых модификаций материалов (циркония и карбида кремния) при переходе от нормальных температур к криогенной и, тем самым, обеспечить заданную интерферометрическую точность контроля формы рабочей поверхности штатного образца зеркала контроллера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронный ресурс <http://millimetron.ru>.
 2. Электронный ресурс <http://www.photonics.su/journal/2015/1>. Самое большое зеркало-рефлектор в мире. – Фотоника, 2015, № 1 (49), с.111.
 3. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1976.
 4. Jedamzik R., Westerhoff T. ZERODUR® TAILORED for Cryogenic Application (Schott AG). – Advanced Optics, D-55122 Mainz.
 5. Westerhoff T., Jedamzik R., Hartmann P. Zero Expansion Glass Ceramic ZERODUR Roadmap for Advanced Lithography. – Proc. SPIE, 2013, v. 8683.
 6. Максутов Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. – М.: Наука, 1984.
 7. Патент № 2467286 РФ. Устройство юстировки двухзеркальной центрированной оптической системы./Балоев В.А., Иванов В.П., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мельников А.Н. и др. от 20.11.2012. (Бюл. изобр., 2012, № 32. МКИ G 01 B 11/27).
 8. Балоев В.А., Иванов В.П., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мельников А.Н. и др. Прецизионный метод контроля юстировки двухзеркальных телескопов на основе использования системы кольцевых синтезированных голографм. – Оптический журнал, 2012, т. 79, № 3, с. 56-64.
- the wavelength of laser light source $\lambda = 632.8$ nm;
 - distance from "point" radiation source (plane of diaphragm 5) to on-axis computer-generated hologram 6 is ~ 3000 mm;
 - parameters of on-axis computer-generated hologram 6:
 - blank – plane-convex;
 - material – Zerodur (possibly, astro-glassceramics);
 - optical diameter 980 mm;
 - curvature radius of convex surface 1300 mm;
 - diffraction structure is fabricated on plane surface;
 - maximum spatial frequency $n_{\max} = 850$ mm $^{-1}$.
- Experience has proven that it is appropriate to implement this optical testing layout in interferometer with vertical orientation of interfering rays.
- When performing attestation control of operating surface of convergent mirror in the thermal vacuum chamber imitating the space environment, it is appropriate to locate only computer-generated hologram 6 and controlled convergent mirror 7 in this chamber; all other elements of interferometer should be placed outside the chamber.
- Currently, there is circular ruling engine of MDG type providing the production of on-axis computer-generated holograms with the diameter up to 600 mm at JSC "NPO "State Institute of Applied Optics", and possible technical solutions for bringing the threshold diameter of on-axis computer-generated holograms up to 1000 mm, including the creation of new circular ruling engine, are being developed.
- It should be noted that creation of such circular ruling engine is relevant from the point of view of necessity of solution of the other significant problem of telescope construction – precision laser-holographic control of the adjustment process of two-mirror telescopes of Cassegrain and Ritchey-Chretien types [7, 8].
- It is understood that the physical investigations using the models of convergent mirror with the diameter up to 200 mm and technological equipment and laser-holographic measuring instrumentation, which exist at JSC "NPO "State Institute of Applied Optics", must precede the practical implementation of suggested technical solution. These studies will take into account the changes in the optical parameters of actually used material modifications (Zerodur and silicon carbide) during the transition from normal to cryogenic temperatures and thereby ensure the given interferometric accuracy of the measurement the shape of the operating surface of the full-size staff convergent mirror.