

Возможности лазерно-голографического контроля процессов восстановления расчетной формы и заданного позиционирования компонентов крупноформатной оптической системы в условиях космического базирования на примере телескопа «Миллиметр»

А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе рассматриваются новые схемы лазерно-голографического контроля процессов восстановления расчетной формы и заданного позиционирования компонентов крупноформатной оптической системы в условиях космического базирования на примере телескопа «Миллиметр». Обсуждаются особенности их реализации. В качестве иллюстрации приводятся частотные характеристики осевых синтезированных голограммных оптических элементов, выполняющих функцию оптических компенсаторов.

Ключевые слова: Компоненты крупноформатной оптической системы, Восстановление расчетной формы, Позиционирование, Лазерно-голографический контроль, Осевой синтезированный голограммный оптический элемент, Условия космического базирования, Телескоп «Миллиметр».

Цитирование: Лукин, А. В. Возможности лазерно-голографического контроля процессов восстановления расчетной формы и заданного позиционирования компонентов крупноформатной оптической системы в условиях космического базирования на примере телескопа «Миллиметр» / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 145–150.

В связи с актуальной потребностью в получении больших объемов информации при изучении объектов дальнего космоса, вопросов космологии и расширении изучаемых границ Вселенной одной из современных тенденций в области создания оптических телескопов является разработка и построение крупноформатных обсерваторий наземного и космического базирования. В них крупногабаритные главные зеркала (ГЗ) проектируются и изготавливаются в виде составных (сегментных) зеркал вместо монолитных, что открывает возможность увеличения их световых диаметров до нескольких десятков метров [1 – 5].

Для составных ГЗ, имеющих, как правило, асферическую форму поверхности, отличающуюся большими асферичностью, градиентом асферичности и крутизной, на первое место выходит решение ряда задач [5 – 8]:

- контроль процессов восстановления расчетной формы т.н. «материнской» асферической поверхности;
- контроль процесса подъюстировки асферической формы поверхности во время эксплуатации;
- контроль процессов юстировки взаимного расположения ГЗ и вторичного зеркала.

Для телескопов наземного базирования также должны решаться задачи коррекции турбулентности атмосферы.

В настоящее время используются следующие методы контроля процессов сборки и юстировки крупногабаритных асферических составных зеркал [5 – 13]:

- геодезические, в т.ч. с использованием трекеров, лазерных дальномеров (сложны в реализации, трудоемкие, многостадийные, менее точные, невозможно использовать в космических условиях во время эксплуатации);

- интерференционный с компенсатором (требует изготовления дорогих объективов-компенсаторов или крупногабаритных зеркальных компенсаторов, имеются ограничения по относительному отверстию, невозможно использовать в космических условиях как вспомогательного элемента телескопа во время эксплуатации);

- лазерно-голографический на основе использования синтезированных голограммных оптических элементов (СГОЭ) в качестве оптического компенсатора (имеются технологические ограничения по световому диаметру СГОЭ и пространственной частоте дифракционной структуры, невозможно использовать в космических условиях в качестве вспомогательного элемента телескопа во время эксплуатации).

На рис. 1 представлены общий вид и принципиальная оптическая схема телескопа космической обсерватории «Миллиметрон», а также общий вид одного из вариантов панелей первого яруса телескопа.

Основные технические характеристики составного главного зеркала (СГЗ) телескопа «Миллиметрон» [1, 7]:

- рабочая поверхность СГЗ — вогнутая параболическая, описываемая уравнением $y^2 = 9600x$;

- диаметр СГЗ равен 10 м;

- СГЗ состоит из четырех типов отдельных панелей, которые должны сформировать четыре яруса; общее количество панелей СГЗ — 96;

- первый ярус — монолитная центральная часть СГЗ световым диаметром 3 м с центральным отверстием;

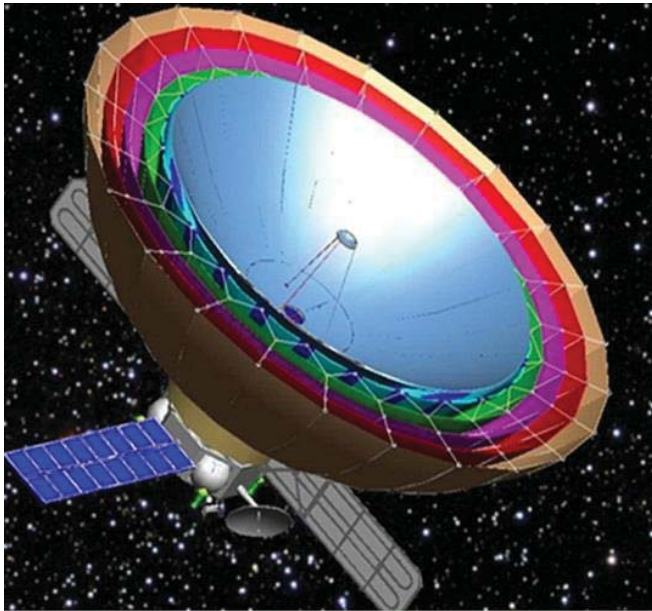
- каждая из панелей 2 – 4-го ярусов устанавливается на подвижных опорах-актуаторах;

- материал панелей — высокомодульный цианат-эфирный углепластик.

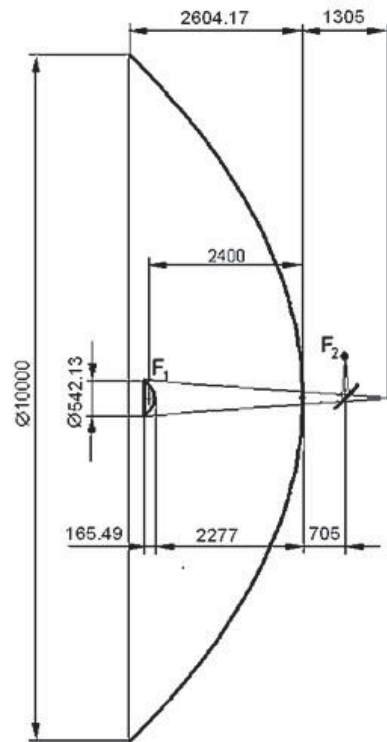
Одним из возможных подходов для обеспечения контроля процесса восстановления расчетной формы СГЗ в условиях космического базирования на этапе его раскрытия и последующих этапах эксплуатации с учетом регулярного мониторинга его асферической формы и подъюстировки является реализация технического решения, предложенного в [14] и основанного на использовании:

- осевого СГОЭ в виде кольцевой структуры (или симметричных сегментов подобного СГОЭ), нанесенного на рабочую поверхность выпуклого вторичного зеркала;

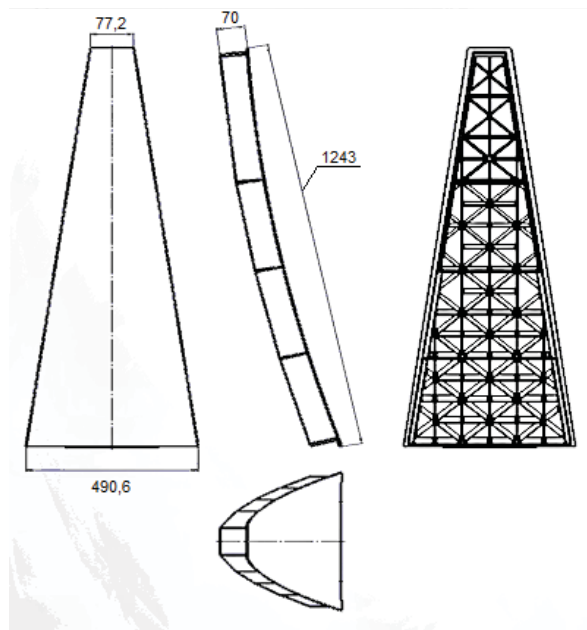
- квази-автоколлимационного хода лучей с обращением волнового фронта в объектной ветви лазерно-голографической контрольной схемы, при этом конгруэнция падающих на осевой СГОЭ и дифрагированных от него лучей должны совпадать.



а) общий вид телескопа



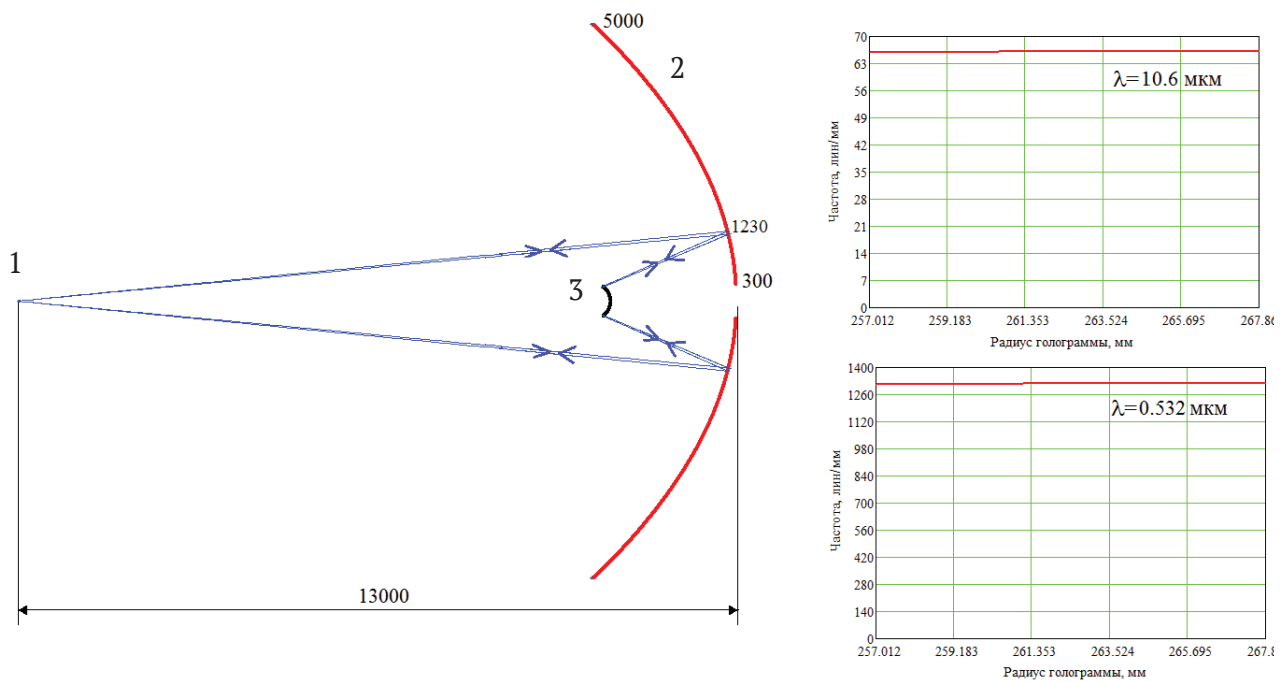
б) принципиальная оптическая схема телескопа



в) общий вид и габариты одного из вариантов панелей первого яруса (секторов центрального зеркала, которое в итоге должно стать монолитным)

Рис. 1. Космическая обсерватория «Миллиметрон» (плановый запуск 2029 г.) [1, 7]

На рис. 2 приведены одна из возможных реализаций контрольной схемы (упрощенно) и частотные характеристики дифракционных структур соответствующих осевых СГОЭ для двух лазерных длин волн.



а) принципиальная оптическая схема объектной ветви, СГОЭ-компенсатор нанесен в краевой зоне выпуклого гиперболического вторичного зеркала

б) расчетные частотные характеристики дифракционных структур СГОЭ-компенсатора для длин волн 10,6 и 0,532 мкм

1 — монохроматический точечный источник излучения, 2 — СГЗ, 3 — выпуклое вторичное зеркало

Рис. 2. Предлагаемая схема контроля формы поверхности СГЗ телескопа «Миллиметрон» с квази-автоколлимационным ходом лучей на основе обращения волнового фронта объектной ветви и возможностью реализации в космических условиях

Контроль процессов юстировки заданного взаимного расположения СГЗ и вторичного зеркала предлагается реализовать на основе использования другого технического решения, изложенного в [12, 15]. При этом также предлагается применить выпуклое вторичное зеркало в качестве подложки соответствующих автоколлимационных осевых юстировочных СГОЭ. В данном случае юстировочные СГОЭ также могут быть реализованы в виде кольцевых голограмм либо в виде симметричных голограмм-сегментов (в виде парных сегментов — через 90 градусов или в виде тройных сегментов — через 120 градусов). Следует отметить, что изготовление этих юстировочных СГОЭ-сегментов усложняется с ростом крутизны рабочей поверхности вторичного зеркала, поэтому одним из возможных путей изготовления этих дифракционных структур — применение делительной техники маятникового типа [16 – 18].

В заключение важно отметить следующее:

- наибольшую актуальность и сложность представляет контроль процесса восстановления расчетной формы и подъюстировки сегментов СГЗ телескопов в ходе их эксплуатации в условиях космического базирования;

- предложенное АО «НПО ГИПО» техническое решение (датчик волнового фронта) на примере телескопа «Миллиметрон», основанное на использовании СГОЭ, нанесенного в краевой зоне выпуклого гиперболического вторичного зеркала, и обращения волнового фронта в объектной ветви лазерно-голографического интерферометра (квази-

автоколлимационный ход лучей), открывает возможность периодического мониторинга и выполнения процесса подъюстировки формы СГЗ в космических условиях;

– для обеспечения полной проработки предложенного решения (метода и устройства) с учетом численного и натурного моделирования необходимо выполнение комплексной НИОКР с участием Астрокосмического центра ФИАН, АО «НПО ГИПО» и других заинтересованных соисполнителей;

– одной из ключевых задач комплексной НИОКР является разработка и создание делительных машин нового типа, в том числе круговой — для формирования дифракционных структур СГОЭ на рабочих поверхностях вторичных зеркал диаметром до 2000 мм.

Список источников

- [1] Астрокосмический центр ФИАН. Космическая обсерватория «Миллиметрон» / URL: <http://millimetron.ru>.
- [2] Космический телескоп «James Webb Space Telescope» / URL: <https://www.jwst.nasa.gov>.
- [3] Телескоп «Extremely Large Telescope» / URL: <http://www.elt.eso.org>.
- [4] Сравнение диаметров главных зеркал основных крупноформатных телескопов по состоянию на март 2021г. / URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_optical_telescope_primary_mirrors.svg.
- [5] **Бронштейн, Ю. Л.** Крупногабаритные зеркальные системы (контроль геометрии, юстировка) / Ю. Л. Бронштейн. — М.: ДПК Пресс, 2015. — 600 с.
- [6] **Лукин, А. В.** Новые возможности лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки крупноформатных составных зеркал телескопов / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 80 – 94.
- [7] **Лукин, А. В.** О возможностях лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки составного главного зеркала телескопа на примере космической обсерватории «Миллиметрон» / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов, В. Н. Пышнов // Оптический журнал. — 2017. — Том 84. — № 12. — С. 45–49.
- [8] **Устинов, Н. Д.** Астрономический телескоп АСТ-1200 с составным главным зеркалом / Н. Д. Устинов, А. С. Васильев, Ю. П. Высоцкий, Б. Я. Гутников, И. И. Духопел и др. // Оптико-механическая промышленность. — 1985. — № 11. — С. 22–25.
- [9] **Канев, Ф. Ю.** Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования / Ф. Ю. Канев, В. П. Лукин. — Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. — 250 с.
- [10] **Патент на изобретение № 2375676 РФ.** Способ юстировки двухзеркальных центрированных оптических систем / В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. А. Нюшкин. — Заяв. 13.12.2007. — Опубл. 10.12.2009.
- [11] **Иванов, В. П.** Юстировка двухзеркальных центрированных оптических систем с использованием синтезированных голограммных оптических элементов / В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. А. Нюшкин // Оптический журнал. — 2010. — Том 77. — № 6. — С. 14–18.
- [12] **Балоев, В. А.** Прецизионный метод контроля юстировки двухзеркальных телескопов на основе использования системы кольцевых синтезированных голограмм / В. А. Балоев, В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов, А. М. Ураскин, Ю. П. Чугунов // Оптический журнал. — 2012. — Том 79. — № 3. — С. 56–64.
- [13] **Белозёров, А. Ф.** Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Ч. 1 / А. Ф. Белозёров, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Фотоника. — 2014. — № 4 (46). — С. 12–32.

- [14] **Патент на полезную модель № 211189 РФ.** Голографическое устройство для контроля формы асферических оптических поверхностей / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочиллов. — Заяв. 01.02.2022. — Опубл. 25.05.2022.
- [15] **Патент на изобретение № 2467286 РФ.** Устройство юстировки двухзеркальной центрированной оптической системы / В. А. Балоев, В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочиллов, А. М. Ураскин, Ю. П. Чугунов. — Заяв. 06.06.2011. — Опубл. 20.11.2012.
- [16] **Патент на изобретение № 2691821 РФ.** Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на неплоских рабочих поверхностях / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Заяв. 26.02.2018. — Опубл. 18.06.2019.
- [17] **Melnikov, A.** New Technical Solutions in the Production Method of High-Aperture Ruled Diffraction Gratings / A. Melnikov, A. Lukin // The European Physical Journal Web of Conferences. — 2019. — Vol. 215. (EOS Optical Technologies, 2019). — 09003 / URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921509003>.
- [18] **Мельников, А. Н.** Технологии формообразования светосильных дифракционных оптических элементов на основе использования делительной техники маятникового типа / А. Н. Мельников // Фотоника. — 2019. — Том 13. — № 5. — С. 468–475. — DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.5.468.475

Possibilities of laser-holographic control of the processes of design form restoration and the preset positioning of the components of a large-format optical system in space-based conditions, on the example of the “Millimetron” telescope

A. V. Lukin, A. N. Melnikov, A. F. Skochilov

JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

In this report we consider new schemes for laser-holographic control of the processes of design form restoration and the preset positioning of the components of a large-format optical system in space-based conditions using the “Millimetron” telescope as an example. Also, the features of their implementation are discussed. As an illustration, the spatial frequency characteristics of axial computer-generated hologram optical elements that perform the function of optical compensators are provided.

Keywords: Components of a large-format optical system, Design form restoration, Positioning, Laser-holographic control, Axial computer-generated hologram optical element, Space-based conditions, «Millimetron» Telescope.