

## Метод контроля качества выпуклого гиперболического зеркала радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон»

© Д.Т. Пуряев, В.И. Батшев, О.В. Польщикова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

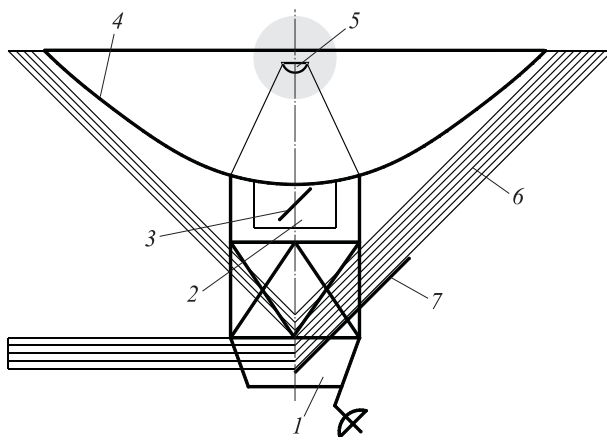
*Предложен неинтерференционный метод контроля качества выпуклого гиперболического зеркала, входящего в состав радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон». Метод основан на измерении координат световых пятен, образованных узкими световыми пучками, отраженными от контролируемого зеркала. Для реализации разработанного метода, в отличие от известных методов, не требуется применение дополнительных крупногабаритных оптических деталей.*

**Ключевые слова:** радиотелескоп, космическая обсерватория, асферическое зеркало, измерение, контроль.

**Введение.** Согласно проекту «Миллиметрон» [1–3], предполагается создание космической обсерватории миллиметрового, субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн (от 20 мкм до 20 мм) с криогенным телескопом диаметром 10 м. Проект входит в Федеральную Космическую программу, его разрабатывают в АКЦ ФИАН под руководством академика Н.С. Кардашева.

В качестве оптической системы телескопа [2] выбрана классическая система Кассегрена (рис. 1). Главное зеркало диаметром 10 м имеет форму параболоида с фокусным расстоянием 2 800 мм и является составным. Вторичное зеркало диаметром 600 мм имеет форму гиперboloида с радиусом кривизны при вершине 275 мм и конической константой  $k = -\varepsilon^2 = -1,1472777$ , где  $\varepsilon$  — эксцентриситет меридионального профиля гиперboloида. Конструктивные параметры оптической системы приведены в таблице.

Одной из основных проблем создания телескопа является обеспечение высокого качества изображения, для чего, в свою очередь, требуется применение высококачественных методов измерения и контроля формы асферических зеркал телескопа. Особенность оптической схемы телескопа заключается в большом (порядка 30-кратном) линейном увеличении вторичного гиперболического зеркала, что обуславливает предъявление более жестких требований к качеству изготовления вторичного зеркала, чем к качеству главного. Погрешность формы вторичного зеркала должна составлять не более 5 мкм.



**Рис. 1.** Схематическое изображение космической обсерватории «Миллиметр»:

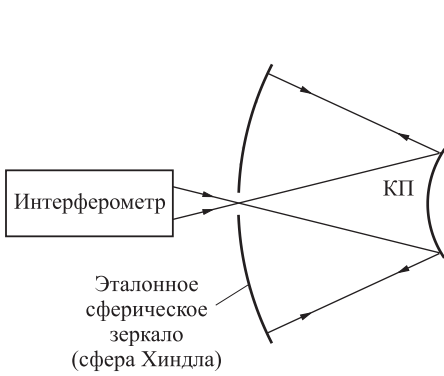
1 — системы управления и навигации; 2 — фокальная аппаратура; 3 — наклонное зеркало; 4 — главное зеркало; 5 — вторичное зеркало; 6 — радиационные экраны; 7 — солнечные батареи

### Параметры оптической системы радиотелекопа

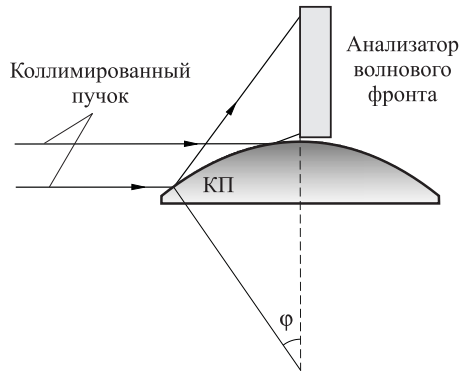
Параметр	Зеркало	
	главное	вторичное
Вершинный радиус кривизны, мм	-5 600	-275
Коническая константа	-1	-1,1472778
Стрелка прогиба, мм	-3 214,3	-157,1
Световой диаметр, мм	10 000	600
Осевое расстояние, мм	-2 667,2	

Кроме того, контроль формы выпуклых поверхностей, как известно из [4, 5], осуществлять сложнее по сравнению с контролем формы вогнутых поверхностей. Поэтому задача контроля формы выпуклого зеркала является актуальной. Попытка ее решения стандартными методами приводит к необходимости использования вспомогательных оптических элементов, диаметры которых существенно превышают диаметр контролируемой поверхности (КП) [4, 5], или к контролю отдельных участков КП с последующей сшивкой топографической карты КП.

Одним из примеров стандартных методов контроля является метод Хиндла для контроля выпуклых гиперболических зеркал [4, 5]. Данный интерференционный метод основан на организации автоколлимационного хода лучей в рабочей ветви с помощью эталонного сферического зеркала. При этом диаметр эталонного зеркала существенно больше диаметра КП (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема Хиндла для контроля выпуклых гиперболических поверхностей



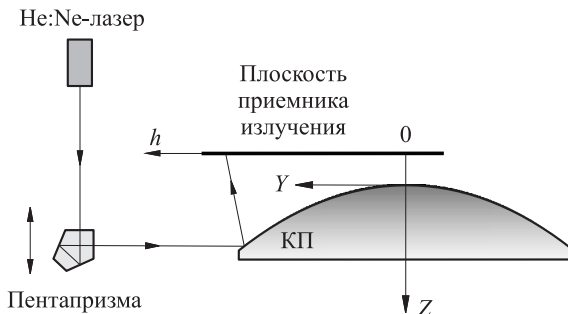
**Рис. 3.** Схема ортогональных лучей

Для решения этой проблемы можно применять так называемую схему ортогональных лучей [6], согласно которой контролируемую деталь освещают пучком параллельных лучей, ориентированных перпендикулярно оси симметрии КП (рис. 3). В структуре отраженного от КП пучка содержится информация о форме КП. Для анализа отраженного пучка могут быть использованы различные методы [7–9], например интерференционный [9, 10] или метод Гартмана [11].

Схема ортогональных лучей применима для контроля выпуклых асферических поверхностей большого диаметра. Однако область ее применения ограничена величиной апертурного угла КП. Как видно на рис. 3, чем больше угол наклона нормали  $\varphi$  к крайней точке КП, тем больший размер анализатора волнового фронта требуется.

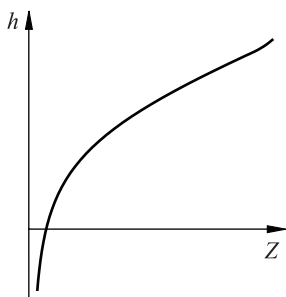
Для контроля вторичного зеркала телескопа «Миллиметрон» схема ортогональных лучей нуждается в некоторой модификации.

**Метод контроля.** Схема предлагаемого метода контроля показана на рис. 4. Узкий пучок лучей, формируемый He:Ne-лазером, по-

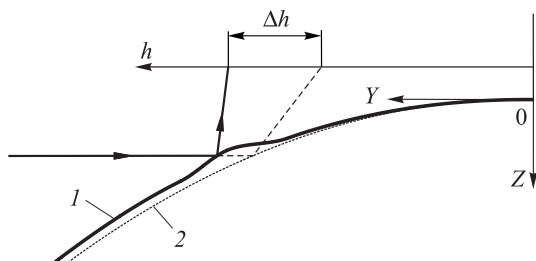


**Рис. 4.** Схема контроля гиперболического зеркала телескопа «Миллиметрон»

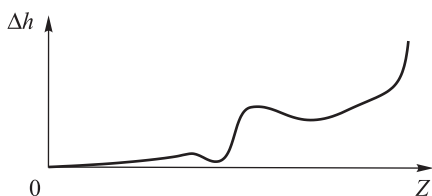
средством пентапризмы направляется на КП перпендикулярно ее оси симметрии. После отражения от КП пучок попадает в плоскость приемника излучения (ПИ), регистрирующего световое пятно. Измеряемая координата  $h$  энергетического центра этого пятна зависит от формы КП. Измерение профиля КП проводят посредством перемещения пентапризмы по вертикали (вдоль оси  $OZ$ ). По результатам измерений строится функция  $h(z)$  (рис. 5), где  $z$  — стрелка прогиба КП. Наличие погрешностей формы КП (рис. 6) приведет к отличию  $\Delta h$  измеряемых координат  $h$  от их теоретических значений (рис. 7).



**Рис. 5.** Зависимость измеряемых координат световых пятен от координат пентапризмы



**Рис. 6.** Отклонение профиля КП (1) от теоретического профиля зеркала (2)



**Рис. 7.** Отклонение координат световых пятен от теоретически вычисленных значений

С помощью математической обработки, полученной в результате измерений функции  $h(z)$ , можно восстановить профиль КП: форму поверхности КП восстанавливают путем «сшивания» множества ее профилей.

В качестве приемника излучения можно использовать, например, составной приемник из нескольких линейных или матричных приемников. Плоскость приемника излучения расположена перпендикулярно оси симметрии КП с целью уменьшить габариты приемника.

Алгоритм математической обработки результатов измерений реализуется в два этапа. На первом этапе методом наименьших квадратов определяют геометрические параметры асферической поверхности второго порядка, ближайшей к КП — ее вершинный радиус и коническую константу; на втором — отклонения КП от ближайшей асферической поверхности второго порядка.

**Оценка точности метода.** Погрешность метода (т. е. погрешность определения координат точек КП) зависит от многих факторов, основными из которых являются погрешности определения координат центров световых пятен и погрешности юстировки. Под последними понимают погрешности взаимного расположения КП и приемника излучения, погрешности определения координат пентапризмы и др.

Анализ чувствительности метода к различным типам погрешностей формы КП выполнен путем численного моделирования погрешностей КП. При этом считают, что погрешность определения координат регистрируемых световых пятен составляет 5 мкм, а погрешности юстировки отсутствуют. Математическое моделирование погрешностей формы КП проводят в целях исследования характера их влияния на координаты регистрируемых световых пятен.

Моделировали следующие виды погрешностей формы:

- погрешность вершинного радиуса  $\Delta r$ ;
- погрешность конической константы  $\Delta k$ ;
- местная погрешность формы, представленная в виде гауссоиды с амплитудой  $A$ .

В результате анализа установлены максимальные значения  $\Delta r$ ,  $\Delta k$  и  $A$ , которые вызывают отклонения световых пятен в пределах 5 мкм. Они составляют:  $\Delta r = 40$  мкм;  $\Delta k = 0,004$ ;  $A = 10$  мкм.

Эти результаты подлежат уточнению с учетом погрешностей юстировки и других факторов, влияющих на погрешность контроля. Однако они позволяют сделать предварительное заключение о том, что разработанный метод удовлетворяет требуемой точности контроля вторичного зеркала телескопа «Миллиметрон».

**Заключение.** Разработанный метод контроля качества выпуклого гиперболического зеркала радиотелескопа «Миллиметрон» прост в реализации и обеспечивает достаточную точность контроля без применения крупногабаритных вспомогательных оптических деталей.

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

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кардашев Н.С. [и др.] Проект Миллиметрон. *Тр. Физич. ин-та им. П.Н. Лебедева*, 2000, т. 228, с. 112.
- [2] Пуряев Д.Т., Батшев В.И. Оптическая система радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон». *Прикладная оптика — 2008. Сб. тр. МНТК*. Санкт-Петербург, 2008, т. 1, с. 186–190.
- [3] Пуряев Д.Т., Батшев В.И. Оптическая система и методика для контроля позиционирования сегментов составного параболического зеркала радио-

- телескопа космической обсерватории «Миллиметрон». *Измерительная техника*, 2009, т. 52, № 5, с. 29–31.
- [4] Пуряев Д.Т. *Методы контроля оптических асферических поверхностей*. Москва, Машиностроение, 1976, 262 с.
- [5] Малакара Д. (ред.). *Оптический производственный контроль*. Москва, Машиностроение, 1985, 400 с.
- [6] Пуряев Д.Т. *Способ измерения профиля оптических поверхностей*. А.с. 1044969 СССР, МКИ4G 01 В II/24, № 3467407.25-28, заявл. 09.07.82, опубл. 30.09.83, бюл. № 36, 3 с.
- [7] 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, pp. 73891A.
- [8] Малиновская Е.Г., Батшев В.И. Неинтерференционный метод контроля качества выпуклых асферических зеркал большого диаметра. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2011, № 10. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/222015.html>
- [9] Батшев В.И., Польщикова О.В. Интерференционный метод контроля формы выпуклых асферических зеркал. *Сб. тез. докладов конгресса молодых ученых, вып. 2*. Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2012, с. 69.
- [10] Дружин В.В., Пуряев Д.Т. Интерференционный метод для контроля профиля выпуклых асферических зеркал. *Прикладная оптика — 2008. Сб. тр. МНТК*. Санкт-Петербург, 2008, т. 1, с. 214–218.
- [11] 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.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Пуряев Д.Т., Батшев В.И., Польщикова О.В. Метод контроля качества выпуклого гиперболического зеркала радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон». *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/833.html>

**Пуряев Даниил Трофимович** родился в 1934 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1958 г. Д-р техн. наук, профессор. С 1988 по 2006 г. заведующий кафедрой «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 работ, 95 изобретений, 4 книг в области оптических измерений, контроля асферических поверхностей, конструирования офтальмологических приборов.

**Батшев Владислав Игоревич** родился в 1984 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области оптических измерений, астрономической оптики. Автор 7 научных работ. e-mail: [batshev.vlad@gmail.com](mailto:batshev.vlad@gmail.com)

**Польщикова Ольга Валерьевна** родилась в 1990 г., поступила в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Научно-исследовательской работой занимается под руководством Батшева В.И., канд. техн. наук, доцента кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Тематика научно-исследовательской работы: разработка новых методов измерения качества поверхностей выпуклых асферических зеркал.