

## ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Л.Н. Тимашова

timashova@bmstu.ru

Н.Н. Кулакова

nnkulakova@bmstu.ru

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

---

### Аннотация

Проведен теоретический анализ процесса формирования интерференционной картины в лазерном интерферометре на основе волновой теории для определения параметров, влияющих на распределение освещенности в интерференционной картине. Рассмотрена схема интерферометра, реализующая метод анаберрационных точек для контроля отражающих и линзовых параболических поверхностей диаметром 10...80 мм с большим относительным отверстием. Интерферометр содержит лазерный осветитель, светоделительный элемент в виде полупрозрачной плоскопараллельной пластинки с микрозеркальным покрытием (диаметром 0,5...1 мм) в центре, эталонное плоское зеркало. Рассмотрены также схемы интерферометра для контроля выпуклых и вогнутых параболических поверхностей. Получены выражения для распределения амплитуды излучения и освещенности в интерференционной картине с учетом волновой аберрации контролируемой поверхности. Приведена методика измерения погрешности контролируемой параболической поверхности по величине искажения периода интерференционной картины. Величина искажения в изображении интерференционной картины должна быть не меньше размера светочувствительного элемента выбранного матричного приемника излучения. Приведены формулы для расчета параметров компонентов интерферометра исходя из требуемой погрешности измерения и параметров матричного приемника излучения и пример расчета параметров компонентов интерферометра и погрешности контроля па-

### Ключевые слова

*Интерферометр, интерференционная картина, интерференционная полоса, полупрозрачная плоскопараллельная пластинка, плоское зеркало, матричный приемник излучения, волновой фронт, лазер*

рабочей поверхности. Показано, что погрешности измерения формы вогнутой и выпуклой параболических поверхностей составляют  $\delta = \lambda / 44$  и  $\delta = \lambda / 66$

Поступила 13.11.2023

Принята 09.01.2024

© Автор(ы), 2024

---

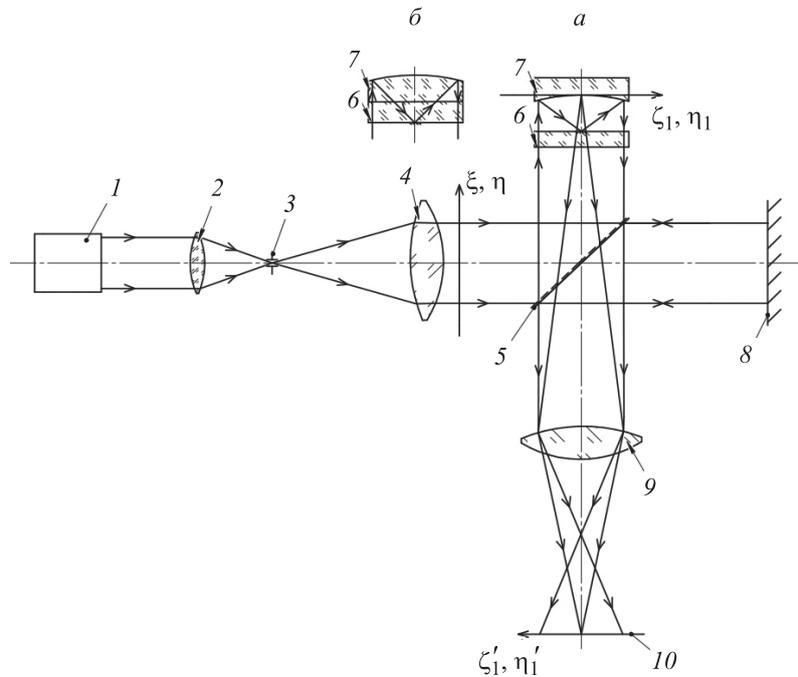
**Введение.** В настоящее время асферические поверхности (АП) получают все более широкое распространение во всех категориях оптических систем. Применение АП вместо сферической во многих случаях позволяет существенно улучшить качество изображения, уменьшить габаритные размеры и массу прибора. Линзы с параболической поверхностью широко применяются в лупах, широкоугольных окулярах зрительных труб, объективах, в сложных оптических системах специального назначения. Поэтому их высокоточный контроль является актуальной задачей. Параболические поверхности таких линз имеют, как правило, большое относительное отверстие и сравнительно небольшой диаметр, порядка 10...80 мм. Стекло (наряду с современными полимерами) традиционно является основным материалом для изготовления оптических деталей, в том числе и с АП. Обработка стекла при изготовлении параболических преломляющих или отражающих поверхностей обычно состоит из следующих процессов: продольное точение с помощью плоских резцов, имеющих профиль сечения изготавливаемой поверхности; шлифовка свободным абразивом; полировка порошками. Специфическая особенность этой технологии — осесимметричные ошибки изготовления поверхности. Поэтому наряду с методами изготовления параболических поверхностей не менее важно уметь учитывать методы контроля их формы.

Асферические поверхности, образованные вращением кривых второго порядка, имеют замечательное свойство: геометрические фокусы этих кривых являются оптически сопряженными анаберрационными точками. Если АП имеет идеальную форму и точечный источник расположен в одном из геометрических фокусов, то отраженные от АП лучи образуют сферический волновой фронт, центр кривизны которого совпадает с другим геометрическим фокусом. Методы контроля АП, основанные на использовании анаберрационных точек, по существу сводятся к исследованию волнового фронта, образованного отраженными от контролируемой АП лучами. В настоящей работе рассматривается схема интерферометра, реализующая метод анаберрационных точек для контроля отражающих параболических поверхностей диаметром 10...80 мм.

Интерферометры — это одни из самых точных измерительных приборов, позволяющих контролировать форму оптических поверхностей

с точностью до единиц нанометра [1–12]. Огромное многообразие различных схем интерферометров для контроля АП не поддается полному описанию, тем не менее разработка новых вариантов оптических схем высокоточных интерферометров простой конструкции является важной задачей.

Цель настоящей работы — разработка новой схемы интерферометра для контроля параболических поверхностей и теоретический анализ формирования изображения интерференционной картины на матричном приемнике излучения (МПИ) [12–20]. Отличительной особенностью интерферометра является простота конструкции и возможность контролировать с высокой точностью как вогнутые, так и выпуклые параболические поверхности диаметром до 80 мм. Схема интерферометра, поясняющая принцип его работы, приведена на рисунке.



Принципиальная схема лазерного интерферометра для контроля параболических отражающих поверхностей:

- a* — отражающая параболическая поверхность; *b* — преломляющая параболическая поверхность; 1 — лазер; 2 — фокусирующая линза; 3 — диафрагма; 4 — объектив;  
5 — полупрозрачная плоскопараллельная светоделительная пластинка;  
6 — плоскопараллельная пластина; 7 — контролируемая параболическая поверхность;  
8 — эталонное плоское зеркало; 9 — объектив сопряжения; 10 — МПИ

Интерферометр содержит последовательно установленные лазерный источник излучения 1, фокусирующую линзу 2, диафрагму 3, установленную в заднем фокусе линзы 2, которая вместе с объективом 4 образует телеско-

пическую систему Кеплера, служащую для расширения пучка и уменьшения его расходимости. Диафрагма 3 с малым отверстием в центре служит для формирования сферического волнового фронта и устранения вредного фона. Объектив 4, выполненный из поглощающего стекла для выравнивания амплитуды выходного параллельного пучка [1], скорректирован на сферическую абберацию и кому. Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива, поступает на полупрозрачную плоскопараллельную светоделительную пластинку 5 и разделяется на два. Один идет в рабочую ветвь интерферометра, где расположены изготовленные из стекла одинаковой марки плоскопараллельная пластина 6 и линза 7 с контролируемой параболической поверхностью (рисунок, а). Верхняя поверхность пластины 6 совмещена с фокальной плоскостью отражающей параболической поверхности (рисунок, б). На верхней поверхности пластины 6 вокруг фокуса параболической поверхности линзы 7 нанесено зеркальное покрытие малого диаметра (0,5...1 мм). Центральное экранирование практически отсутствует. Другой пучок лучей после светоделительной пластинки 5 поступает в эталонную ветвь интерферометра, в которой установлено эталонное плоское зеркало 8. Фокус параболы является анаберрационной точкой, поэтому пучок лучей, отраженный от контролируемой поверхности и прошедший в обратном направлении через полупрозрачную плоскопараллельную пластинку 5, является параллельным. Волновой фронт, выходящий из рабочей ветви, интерферирует с плоским волновым фронтом, идущим из эталонной ветви. Интерференционная картина наблюдается в регистрирующей ветви интерферометра, состоящей из объектива сопряжения 9 и МПИ 10. Для получения интерференционных полос необходимо наклонить эталонное зеркало 8. При наличии осесимметричных погрешностей  $\delta$  на контролируемой поверхности рабочий волновой фронт деформируется, что проявляется в искажении интерференционных полос. Погрешности вогнутой параболической поверхности переносятся на рабочий волновой фронт в четырехкратном размере  $\Delta l = 4\delta$  (см. рисунок, б). Погрешности выпуклой параболической поверхности вызывают деформацию рабочего волнового фронта  $\Delta l = 4n\delta$ , где  $n$  — показатель преломления стекла линзы 7 и пластины 6 (см. рисунок, а). Зеркальное покрытие нанесено на нижнюю поверхность пластины 6, при  $n \approx 1,5$  получим  $\Delta l = 6n\delta$ . Объектив сопряжения 9 совмещает изображение контролируемой поверхности с плоскостью регистрации интерференционной картины, т. е. с МПИ. Это позволяет определить координаты погрешностей на контролируемой поверхности.

**Параметры элементов схемы интерферометра.** Приведем параметры лазера: длина волны излучения лазера  $\lambda$ , мощность излучения лазера  $\Phi_{\text{л}}$ , амплитуда излучения  $A_{\text{л}}(\lambda) = \Phi_{\text{л}}^{1/2}$ .

Приведем параметры телескопической системы: коэффициенты пропускания телескопической системы  $t_{\text{т.с}} = 0,6$  — по амплитуде,  $\tau_{\text{т.с}} = 0,36$  — по интенсивности [1].

Распределение амплитуды за телескопической системой в плоскости  $\xi, \eta$ :

$$A_{\text{т.с}}(\xi, \eta, \lambda) = A_{\text{т.с}}(\lambda),$$

где  $A_{\text{т.с}}(\lambda) = \sqrt{\Phi(\lambda)} t_{\text{т.с}}(\lambda)$ .

Приведем параметры светоделительной пластинки: коэффициент пропускания (по амплитуде)  $t_{\text{сд}}(\lambda)$ , коэффициент отражения (по амплитуде)  $r_{\text{сд}}(\lambda)$ .

**Рабочий волновой фронт.** Искажения рабочего волнового фронта, вносимые погрешностями параболы, выражаются через его волновую aberrацию  $\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)$  в пределах прямоугольного зрачка  $\xi_{1\text{зр}}, \eta_{1\text{зр}}$ , сопряженного с прямоугольным МПИ.

Аберрационная функция зрачка:

$$P_{\text{аб}}(\xi_1, \eta_1, \lambda) = P_{\text{зр}}(\xi_1, \eta_1) \exp[jk\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)],$$

где  $P_{\text{зр}}(\xi_1, \eta_1) = \text{rect}\left(\frac{\xi_1}{2\xi_{1\text{зр}}}, \frac{\eta_1}{2\eta_{1\text{зр}}}\right)$  — функция, описывающая форму зрачка;  $k$  — волновое число.

Лазерный пучок лучей дважды отражается от контролируемой поверхности. Поскольку погрешности параболы осесимметричны, они в четырехкратном размере переносятся на рабочий волновой фронт для вогнутой поверхности и в шестикратном размере для выпуклой поверхности. Амплитуда искаженного пучка лучей

$$\begin{aligned} A_1'(\xi_1, \eta_1, \lambda) &= A_{\text{т.с}}(\lambda) r_{\text{сд}}(\lambda) t_{\text{сд}}(\lambda) P_{\text{аб}}(\xi_1, \eta_1, \lambda) = \\ &= A_{\text{т.с}}(\lambda) r_{\text{сд}}(\lambda) t_{\text{сд}}(\lambda) P_{\text{зр}}(\xi_1, \eta_1) \exp[jk\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)]. \end{aligned}$$

**Эталонный волновой фронт.** Для получения интерференционной картины эталонное плоское зеркало повернуто на угол  $\alpha$ . Распределение амплитуды в пределах прямоугольного зрачка  $\xi_{1\text{зр}}, \eta_{1\text{зр}}$ , сопряженное с прямоугольным МПИ, имеет вид:

$$A_2'(\xi_1, \eta_1, \lambda) = A_{\text{т.с}}(\lambda) r_{\text{сд}}(\lambda) t_{\text{сд}}(\lambda) P_{\text{зр}}(\xi_1, \eta_1) \exp(jk2\alpha\xi_1).$$

Амплитуда результирующего колебания от сложения эталонного и рабочего волновых фронтов:

$$A'_{1+2}(\xi_1, \eta_1, \lambda) = A'_1(\xi_1, \eta_1, \lambda) + A'_2(\xi_1, \eta_1, \lambda) = \\ = A_{\text{т.с}}(\lambda) r_{\text{сд}}(\lambda) t_{\text{сд}}(\lambda) P_{\text{зр}}(\xi_1, \eta_1) \left\{ \exp[jk \Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)] + \exp(jk 2\alpha \xi_1) \right\}.$$

Поскольку  $A_{\text{т.с}}(\lambda) = \sqrt{\Phi(\lambda)} t_{\text{т.с}}(\lambda)$ , то, учитывая увеличение объектива сопряжения  $\beta$ , распределение освещенности в плоскости МПИ можно записать так:

$$E'_{1+2}(\xi_1, \eta_1, \lambda) = \frac{1}{\beta^2} |A'_{1+2}(\xi_1, \eta_1, \lambda)|^2 = \\ = \frac{1}{\beta^2} A'_{1+2}(\xi_1, \eta_1, \lambda) A'_{1+2}{}^*(\xi_1, \eta_1, \lambda) = \\ = \frac{1}{\beta^2} \Phi_{\text{л}}(\lambda) t_{\text{т.с}}^2(\lambda) r_{\text{сд}}^2(\lambda) t_{\text{сд}}^2(\lambda) P_{\text{зр}}(\xi_1, \eta_1) \times \\ \times \left\{ \exp[jk \Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)] + \exp(jk 2\alpha \xi_1) \right\} \times \\ \times \left\{ \exp[-jk \Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)] + \exp(-jk 2\alpha \xi_1) \right\}; \\ E'_{1+2}(\xi_1, \eta_1, \lambda) = \frac{1}{\beta^2} \Phi_{\text{л}}(\lambda) \tau_{\text{т.с}}(\lambda) \rho_{\text{сд}}(\lambda) \tau_{\text{сд}}(\lambda) P_{\text{зр}}(\xi_1, \eta_1) \times \\ \times \left\{ 2 + 2 \cos[k 2\alpha \xi_1 - k \Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)] \right\}.$$

Аргумент  $k 2\alpha \xi_1$  определяется пространственной частотой интерференционной картины  $\nu_{\text{и.к}} = 2\alpha / \lambda$ :

$$k 2\alpha \xi_1 = 2\pi \nu_{\text{и.к}} \xi_1.$$

Множитель в выражении для распределения освещенности в плоскости МПИ можно преобразовать как

$$\left\{ 2 + 2 \cos[k 2\alpha \xi_1 - k \Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)] \right\} = \\ = 2 \left\{ 1 + \cos 2\pi \left[ \nu_{\text{и.к}} \xi_1 - \frac{\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)}{\lambda} \right] \right\} = \cos^2 2\pi \cdot 2 \left[ \nu_{\text{и.к}} \xi_1 - \frac{\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)}{\lambda} \right]; \\ E'_{1+2}(\xi_1, \eta_1, \lambda) = \frac{1}{\beta^2} \Phi_{\text{л}}(\lambda) \tau_{\text{т.с}}(\lambda) \rho_{\text{сд}}(\lambda) \tau_{\text{сд}}(\lambda) P_{\text{зр}}(\xi_1, \eta_1) \times \\ \times \cos^2 2\pi \cdot 2 \left[ \nu_{\text{и.к}} \xi_1 - \frac{\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)}{\lambda} \right],$$

где  $t_{т.с}^2(\lambda) = \tau_{т.с}(\lambda)$  и  $t_{сд}^2(\lambda) = \tau_{сд}(\lambda)$  — коэффициенты пропускания телескопической системы и светоделительной пластинки по интенсивности;  $r_{сд}^2(\lambda) = \rho_{сд}(\lambda)$  — коэффициент отражения светоделительной пластинки по интенсивности.

Интерференционная картина с помощью объектива сопряжения прецируется с контролируемой поверхности на МПИ с увеличением  $\beta$ . Параметры объектива выражаются через параметры контролируемой параболической поверхности и параметры МПИ.

Параметры контролируемой параболической поверхности: диаметр зрачка  $D_{зр} = 80$  мм; размеры зрачка  $2\xi_{1зр} \times 2\eta_{1зр} = 64 \times 48$  мм<sup>2</sup>.

Параметры МПИ: размеры матрицы  $a_m \times b_m = 6,4 \times 4,8$  мм, элемента матрицы  $a_э = 5$  мкм, диагонали матрицы  $D_m = 8$  мм.

Параметры объектива сопряжения:  $2\xi_{1и.к} \times 2\eta_{1и.к} = 2\xi_{1зр} \times 2\eta_{1зр} = 64 \times 48$  мм — размеры интерференционной картины;  $\beta = \frac{a_m \times b_m}{2\xi_{1и.к} \times 2\eta_{1и.к}} = 0,1$  — увеличение;  $2W = 30^\circ = 0,5$  рад — угловое поле;  $f' = D_m / (2W) = 160$  мм — фокусное расстояние.

**Расчет параметров интерференционной картины.** Период изображения интерференционной картины  $T'_{и.к} = 10a_э = 50$  мкм. Число периодов на стороне МПИ  $N_T = a_m / T'_{и.к} = 128$ . Пространственная частота изображения интерференционной картины  $\nu'_{и.к} = 1/T'_{и.к} = 20$  мм<sup>-1</sup>. Период интерференционной картины  $T_{и.к} = T'_{и.к} / \beta = 0,5$  мм. Частота  $\nu_{и.к} = 1/T_{и.к} = 2$  мм<sup>-1</sup>.

Для получения интерференционной картины с периодом  $T_{и.к} = 0,5$  мм угол наклона эталонной поверхности должен быть равен  $\alpha = \lambda \nu_{и.к} / 2 = 0,6328 \cdot 10^{-3}$  (мм)  $\cdot 1$  (мм<sup>-1</sup>) = 0,0006328 = 2 угл. мин.

**Оценка погрешности рабочего волнового фронта.** При отсутствии aberrаций рабочего волнового фронта  $\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda) = 0$  распределение освещенности в интерференционной картине

$$E'_{1+2}(\xi_1, \eta_1, \lambda) = \frac{1}{\beta^2} \Phi_l(\lambda) \tau_{т.с}(\lambda) \rho_{сд}(\lambda) \tau_{сд}(\lambda) P_{зр}(\xi_1, \eta_1) \cos^2(2\pi \cdot 2\nu_{и.к} \xi_1).$$

Оценим погрешность рабочего волнового фронта на одном периоде интерференционной картины

$$\xi_1 = T_{и.к.}$$

В идеальной интерференционной картине аргумент

$$v_{и.к.} \xi_1 = \frac{\xi_1}{T_{и.к.}} = 1.$$

В искаженной интерференционной картине период интерференционной полосы  $\Delta T_{и.к.}$  изменяется так:

$T_{и.к.} + \Delta T_{и.к.}$  — искаженный период;

$$\frac{T_{и.к.}}{T_{и.к.} + \Delta T_{и.к.}} = 1 - \frac{\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)}{\lambda};$$

$$\frac{\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)}{\lambda} = 1 - \frac{T_{и.к.}}{T_{и.к.} + \Delta T_{и.к.}} \text{ — искаженный аргумент.}$$

При  $T'_{и.к.} = 10a_\varepsilon$  и  $\Delta T'_{и.к.} = a_\varepsilon$  получим

$$\frac{T_{и.к.}}{T_{и.к.} + \Delta T_{и.к.}} = \frac{T'_{и.к.}}{T'_{и.к.} + \Delta T'_{и.к.}};$$

$$\frac{\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda)}{\lambda} = \frac{1}{11}; \quad \Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda) = \frac{\lambda}{11}.$$

При регистрации искажения периода с погрешностью  $\Delta T'_{и.к.} = a_\varepsilon$  aberrация рабочего волнового фронта, вызванная погрешностями параболы, составляет  $\Delta l(\xi_1, \eta_1, \lambda) = \lambda / 11$ . Поскольку погрешности параболы осесимметричны, они в четырехкратном размере переносятся на рабочий волновой фронт для вогнутой поверхности и шестикратном размере — для выпуклой поверхности, следовательно,  $\delta = \lambda / 44$  — погрешность вогнутой параболы;  $\delta = \lambda / 66$  — погрешность выпуклой параболы. Таким образом, рассматриваемый интерферометр обеспечивает достаточно высокую точность контроля.

Недостатком интерферометра являются большие световые потери в рабочей ветви, если выпуклая параболическая поверхность не является зеркальной (см. рисунок, а). Для увеличения контраста интерференционной картины следует выравнивать интенсивности рабочего и эталонного волновых фронтов. Поэтому при контроле на преломляющую выпуклую параболическую поверхность следует наносить зеркальное покрытие. Последнее необходимо только на стадии контроля. К этому покрытию не предъявляются высокие требования. Такое покрытие можно получить

химическим путем (осаждением серебра из раствора) или вакуумным распылением алюминия. Неравномерность зеркального слоя для выпуклой поверхности не имеет значения. Для получения высокого контраста интерференционной картины в случае контроля вогнутой параболической поверхности (см. рисунок, б) последняя должна быть зеркальной.

**Выводы.** На основании проведенных расчетов выявлено, что

- интерферометр обеспечивает высокоточный контроль выпуклых и вогнутых параболических поверхностей небольшого диаметра до 80 мм с большим относительным отверстием;
- интерферометр позволяет обнаружить погрешности вогнутой и выпуклой поверхностей порядка  $\delta = \lambda / 44$  и  $\delta = \lambda / 66$ ;
- элементы интерферометра не требуют специального изготовления, выпускаются серийно. Простота конструкции прибора очевидна.

**Заключение.** Приведена схема интерферометра, реализующая метод анаберрационных точек для высокоточного контроля отражающих и линзовых параболических поверхностей диаметром 10...80 мм с большим относительным отверстием. Проведен теоретический анализ процесса формирования интерференционной картины в лазерном интерферометре для определения параметров, влияющих на распределение освещенности в интерференционной картине. Приведена методика измерения погрешности контролируемой параболической поверхности по искажению периода интерференционной картины. Размер искажения в изображении интерференционной картины должен быть не меньше размера светочувствительного элемента выбранного МПИ. Приведен пример расчета конструктивных параметров интерферометра и погрешности параболической поверхности. Интерферометр позволяет обнаружить погрешности вогнутой параболической поверхности порядка  $\delta = \lambda / 44$  и погрешности выпуклой параболической поверхности порядка  $\delta = \lambda / 66$ . Указаны способы увеличения контраста интерференционной картины, так как контраст является одним из основных факторов, определяющих точность и производительность измерений, выполняемых на интерферометре. Элементы интерферометра не требуют специального изготовления и серийно выпускаются промышленностью.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. М., Машиностроение, 2004.

- [2] Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. М., Машиностроение, 1978.
- [3] Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М., Машиностроение, 1987.
- [4] Малакара Д., ред. Оптический производственный контроль. М., Машиностроение, 1985.
- [5] Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Ишанин Г.Г. и др. Оптические измерения. М., Логос, 2008.
- [6] Кирилловский В.К. Оптические измерения. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. СПб., ГУ ИТМО (ТУ), 2003.
- [7] Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н. Интерферометр для контроля углов клиньев. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 2 (131), с. 117–129. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-2-117-129>
- [8] Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика. М., Техносфера, 2006.
- [9] Мишин С.В., Кулакова Н.Н., Тирасишин А.В. Адаптация алгоритма поиска координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки для работы с цифровым автоколлиматором. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2016, № 2 (107), с. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-2016-2-117-124>
- [10] Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н., Сазонов В.Н. Оптико-электронная система для измерения сферической аберрации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2018, № 6 (123), с. 112–122. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-2018-6-112-122>
- [11] Кулакова Н.Н., Каледин С.Б., Сазонов В.Н. Анализ погрешностей измерения фокусного расстояния ИК-объективов гониометрическим методом. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2017, № 4 (115), с. 17–26. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-4-17-26>
- [12] Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н. Анализ интерферометра с микрозеркалом на светоделительном кубике. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2021, № 3 (136), с. 129–143. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-3-129-143>
- [13] Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н. Интерферометр для контроля выпуклых гиперболических поверхностей малого диаметра. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2022, № 3 (140), с. 115–130. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-3-115-130>
- [14] Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теория оптико-электронных систем. М., Машиностроение, 1990.
- [15] Якушенков Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов. М., Логос, 2000.

- [16] Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М., Логос, 2004.
- [17] Коротаев В.В. Расчет шумовой погрешности оптико-электронных приборов. СПб., НИУ ИТМО, 2012.
- [18] Абдулкадыров М.А., Дружин В.В., Лазарева Н.Л. и др. Интерферометр для многофункционального оптического контроля. *Контенант*, 2018, № 2, с. 80–84.
- [19] Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. СПб., Лань, 2008.
- [20] Кулакова Н.Н., Пермьяков И.А., Тышкунов Н.В. Объектив Петцваля с расширенным спектральным диапазоном для регистрации интерференционной картины в инфракрасном фурье-спектрометре. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2015, № 3 (102), с. 116–126.  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2015-3-116-126>

**Тимашова Лариса Николаевна** — 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).

**Кулакова Надежда Николаевна** — 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:**

Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н. Лазерный интерферометр для контроля параболических поверхностей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 2 (147), с. 70–83. EDN: DSWFSN

## LASER INTERFEROMETER IN PARABOLIC SURFACE MONITORING

L.N. Timashova

timashova@bmstu.ru

N.N. Kulakova

nnkulakova@bmstu.ru

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

### Abstract

The paper presents results of theoretical analysis of the interference pattern formation process in a laser interferometer based on the wave theory to determine the parameters affecting illumination distribution in the interference pattern. It presents the interferometer diagram implementing the anaberration points' method to monitor the reflective and lens parabolic surfaces with diameter

### Keywords

*Interferometer, interference pattern, interference fringe, translucent plane-parallel plate, plane mirror, matrix radiation detector, wave front, laser*

of 10–80 mm and large relative aperture. The interferometer contains laser illuminator, beam splitter in the form of a translucent plane-parallel plate, plane-parallel plate with the micro-mirror coating in the center (coating diameter 0.5–1 mm), and a reference plane mirror. Diagrams of the interferometer to monitor convex and concave parabolic surfaces are provided. Expressions are obtained for radiation and illumination amplitude distribution in the interference pattern, taking into account wave aberration of the monitored surface. A method for measuring the monitored parabolic surface error based on the interference pattern distortion period is presented. The distortion value in the interference pattern image should be not less than the size of the photosensitive element of the selected matrix radiation detector. Formulas are given to calculate the interferometer components' parameters based on the required measurement error and parameters of the matrix radiation detector. An example is provided of calculating the error of the interferometer components and the error of the parabolic surface monitoring. Calculation results showed that the errors in measuring the concave and convex parabolic surfaces shape were  $\delta = \lambda / 44$  and  $\delta = \lambda / 66$

Received 13.11.2023

Accepted 09.01.2024

© Author(s), 2024

---

## REFERENCES

- [1] Krivoviyaz L.M., Puryaev D.T., Znamenskaya M.A. *Praktika opticheskoy izmeritelnoy laboratorii* [Practice of optical measuring laboratory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004.
- [2] Kreopalova G.V., Puryaev D.T. *Issledovanie i kontrol opticheskikh system* [Research and control on optical system]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978.
- [3] Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987.
- [4] Malakara D., ed. *Optical production control*. New York, John Wiley & Sons, 1983.
- [5] Andreev A.N., Gavrilov E.V., Ishanin G.G., et al. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Logos Publ., 2008.
- [6] Kirillovskiy V.K. *Opticheskie izmereniya. Teoriya chuvstvitelnosti opticheskikh izmeritelnykh navodok. Rol opticheskogo izobrazheniya* [Optical measurements. Theory of sensitivity of optical measuring leads. The role of the optical image]. St. Petersburg, SU ITMO (TU) Publ., 2003.

- [7] Timashova L.N., Kulakova N.N. Interferometer to control wedge angles. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 2 (131), pp. 117–129 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-2-117-129>
- [8] Schroder G., Treiber H. *Technische Optik*. Wurzburg, Vogel-Buchverlag, 2002.
- [9] Mishin S.V., Kulakova N.N., Tirasishin A.V. Adaptation of the algorithm for searching the coordinates of the energy centre in the image of an autocollimating point for working with digital autocollimator. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2016, no. 2 (107), pp. 117–124 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2016-2-117-124>
- [10] Timashova L.N., Kulakova N.N., Sazonov V.N. Opto-electronic system for measurement of spherical aberration. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2018, no. 6 (123), pp. 112–122 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-112-122>
- [11] Kulakova N.N., Kaledin S.B., Sazonov V.N. Error analysis of IR lens focal length measured by a goniometric method. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2017, no. 4 (115), pp. 17–26 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-4-17-26>
- [12] Timashova L.N., Kulakova N.N. Analysis of interferometer with micro-mirror on beam splitting cube. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2021, no. 3 (136), pp. 129–143 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-3-129-143>
- [13] Timashova L.N., Kulakova N.N. Interferometer for monitoring convex hyperbolic surfaces of small diameters. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2022, no. 3 (140), pp. 115–130 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-3-115-130>
- [14] Mosyagin G.M., Nemtinov V.B., Lebedev E.N. *Teoriya optiko-elektronnykh system [Theory of optic-electronic systems]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990.
- [15] Yakushenkov Yu.G. *Proektirovanie optiko-elektronnykh priborov [Design of optoelectronic systems]*. Moscow, Logos Publ., 2000.
- [16] Yakushenkov Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov [Theory and calculation of optic-electronic systems]*. Moscow, Logos Publ., 2004.
- [17] Korotaev V.V. *Raschet shumovoy pogreshnosti optiko-elektronnykh priborov [Theory of optical systems]*. St. Petersburg, NIU ITMO Publ., 2012.
- [18] Abdulkadyrov M.A., Druzhin V.V., Lazareva N.L., et al. Interferometer for multifunctional optical testing. *Kontenant [Contentant]*, 2018, no. 2, pp. 50–54 (in Russ.).
- [19] Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. *Teoriya opticheskikh system [Theory of optical systems]*. St. Petersburg, Lan Publ., 2008.

[20] Kulakova N.N., Permyakov I.A., Tyshkunov N.V. Petzval lens with extended spectral range for registering interference patterns in the infrared Fourier spectrometer. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2015, no. 3 (102), pp. 116–126 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2015-3-116-126>

**Timashova L.N.** — 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).

**Kulakova N.N.** — 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:**

Timashova L.N., Kulakova N.N. Laser interferometer in parabolic surface monitoring. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 2 (147), pp. 70–83 (in Russ.). EDN: DSWFSN