

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ВЫПУКЛЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ МЕНИСКОВОЙ ЛИНЗЫ

С.Ч. Нгуен

chiennx.htbm@gmail.com

В.В. Дружин

vlad.druzhin@gmail.com

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

Аннотация

Выпуклые асферические поверхности находят все большее применение в качестве элементов высокоточных оптических приборов различного назначения. Сложность изготовления таких поверхностей связана с тем, что существующие методы контроля их формы с оптической точностью 20...30 нм требуют использования вспомогательных эталонных оптических элементов, размеры которых в несколько раз больше размеров контролируемой детали. Предложен автоколлимационный метод контроля с использованием концентрической менисковой линзы, размеры которой незначительно превышают размеры контролируемой детали. Приведены результаты расчета конструктивных параметров схемы контроля на основе теории аберраций третьего порядка. Рассмотрено влияние показателя преломления и толщины концентрической менисковой линзы на максимальное и среднеквадратическое отклонение формы поверхности при разных требованиях к радиусам концентрической менисковой линзы. Предложено моделирование разработанной схемы в программе Zemax. Описана оптическая система интерферометра Физо с применением в его схеме объектива с эталонной поверхностью для реализации разработанного метода. Прикладные исследования проведены для контроля вторичных зеркал телескопа Ричи — Кретьена в обсерватории Хоа Лак (Вьетнам) и спутникового телескопа SNAP

Ключевые слова

Асферические зеркала, выпуклые асферические поверхности, оптические измерения, оптический контроль, интерферометры

Поступила 02.09.2022

Принята 30.03.2023

© Автор(ы), 2023

Введение. Контроль асферических поверхностей очень важен для астрономических приборов, лазерных систем, спектрометров, зеркальных фотолитографических объективов и проекционных систем на лобовое стекло. Традиционный метод контроля таких поверхностей обычно выполняется с по-

мощью сферы Хиндла, на вогнутую поверхность которой нанесено полупрозрачное зеркальное покрытие. Основная проблема метода заключается в том, что требуется применение вогнутой сферической поверхности, диаметр которой слишком велик, часто в несколько раз больше, чем диаметр контролируемой поверхности (КП). Это не позволяет контролировать оптические поверхности большего диаметра, а также обеспечить высокоточную обработку [1]. При использовании таких элементов затрудняется контроль и увеличивается стоимость производства оптических деталей. Схема метода и установка для тестирования выпуклой гиперболической поверхности основаны на автоколлимации от сферы, центр которой расположен в мнимом геометрическом фокусе КП (рис. 1) [2, 3].

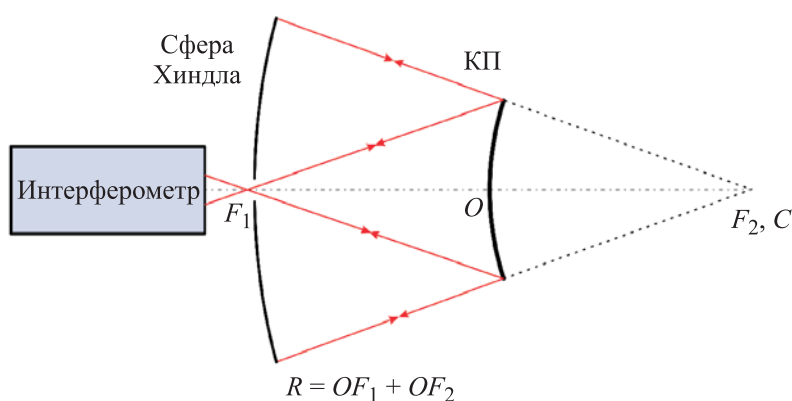


Рис. 1. Схема традиционного метода контроля

Решения задач классического метода контроля асферических поверхностей второго порядка с применением дополнительных измерительных ветвей, которые увеличивают габаритные размеры оптической системы измерения, описаны в [4, 5]. В настоящий момент для преодоления возникающих проблем широко используются корректоры — дифракционные оптические элементы (ДОЭ) и компьютерно-синтезированные голограммы (СГ). Однако для контроля этих элементов необходима высокая точность юстировки оптической системы. Кроме того, ДОЭ и СГ являются дорогостоящими элементами, к ним также предъявляются высокие требования к производству и контролю. Все это свидетельствует о наличии недостатков применения ДОЭ и СГ в схемах контроля формы оптических асферических поверхностей [6].

Метод контроля, предлагаемый в настоящей работе, является модификацией метода [7, 8] и заключается в применении менисковой линзы с полупрозрачным зеркальным покрытием на выпуклой поверхности

вместо сферы Хиндла с полупрозрачным зеркальным покрытием на вогнутой поверхности. При использовании такого элемента на контролируемую поверхность (гиперboloид) направляется сферический волновой фронт, центр кривизны которого совпадает с действительным фокусом гиперboloида. Отраженный от КП волновой фронт сферический с центром кривизны в мнимом фокусе гиперboloида. Далее волновой фронт автоколлимационно отражается от вогнутой сферической поверхности концентрической менисковой линзы (КМЛ), так как центр ее кривизны совмещен с мнимым фокусом КП, что максимально уменьшает размер вспомогательного эталонного оптического элемента. Такой метод позволяет контролировать поверхность с большими апертурой и относительным отверстием с одиночной линзой, диаметр которой почти равен диаметру КП. Схема модификации устройства Хиндла приведена на рис. 2.

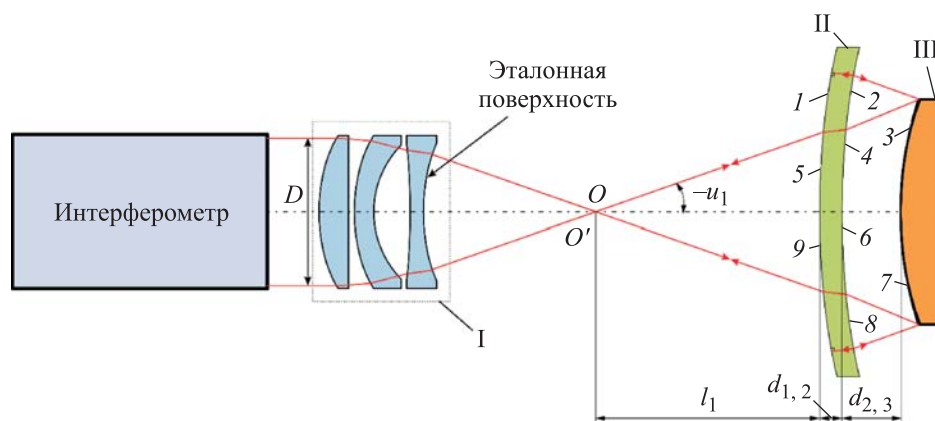


Рис. 2. Схема модификации устройства Хиндла:

I — эталонный объектив; II — КМЛ; III — КП

Измерительная ветвь интерферометра состоит из объектива с эталонной поверхностью, КМЛ и КП. В качестве источника излучения применяется гелий-неоновый (He-Ne) лазер с длиной волны 632,8 нм, так как он имеет высокую точность и когерентность 100 м [9]. Параллельный пучок световых лучей, выходящий из интерферометра, отражается от эталонной поверхности, проходит обратно, поступает в интерферометр и создает эталонный волновой фронт. Пучок лучей, прошедший через поверхности 1 и 2, падает на КП, отражается от нее и снова проходит через поверхность 4 по нормали к поверхности 5. Отразившись от поверхности 5, пучок лучей повторяет свой путь, проходя поверхности 6–9 в обратном направлении. На выходе из эталонного объектива образуется анализируемый (рабочий) волновой фронт. В результате оба волновых фронта формируют в интер-

ферометре интерференционную картину, анализ которой позволяет получить информацию об ошибках КП.

Анализ остаточных ошибок установки схемы контроля и расчет аберраций объектива регистрирующей ветви не выполнялись. Для упрощения исследования указанными ошибками можно пренебречь.

Цель настоящей работы — анализ предлагаемого численного метода расчета КМЛ, заключающегося в определении ее конструктивных параметров в условиях нормировки, и разработанного метода контроля.

Анализ метода расчета КМЛ. Существует метод расчета корректора КМЛ [10], основанный на теории аберраций третьего порядка. В этом случае конструктивные параметры оптической системы в условиях регуляризации определяются по теоретическим выражениям, затем эти конструктивные параметры масштабируются в соответствии с реальными требованиями к известным параметрам КП. Предлагаемый метод расчета КМЛ заключается в определении ее конструктивных параметров по известным конструктивным параметрам системы. Поскольку главное преимущество такого метода состоит в том, что все требуемые параметры КМЛ можно найти за один ход вычисления без масштабирования системы, это приводит к уменьшению общей системы. Недостаток метода — каждая КМЛ подходит только для контроля определенной и конкретной КП.

Расчет схемы контроля. С помощью последующих расчетов определяются конструктивные параметры КМЛ (источник излучения расположен в т. О, см. рис. 2), при которых корректируются аберрации третьего порядка.

Согласно теории аберраций третьего порядка, сферическая аберрация в оптической системе, состоящей из сферических и асферических поверхностей, вычисляется по значениям коэффициентов аберраций:

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=p} h_i \left[P_i + K_i \frac{(\Delta n_i u_i)^3}{(\Delta n_i)^2} \right], \quad (1)$$

где i — номер поверхности; p — номер последней поверхности по ходу луча; h_i — высота первого параксиального луча на поверхности с номером i ; P_i — коэффициент, определяющий сферическую аберрацию данной поверхности; $K_i = (-\varepsilon_i^2)$ — коническая константа несферических поверхностей (ε — эксцентриситет поверхности второго порядка); n_i — показатель преломления материала до i -й поверхности; u_i — угол между осью и первым параксиальным лучом i -й поверхности.

Рассмотрим случай, когда КП имеет радиус при вершине $r_3 = r_7 = r$, $K_3 = K_7 = K$, увеличение КП $\beta = u_3 / u'_3$, толщина КМЛ $d_{1,2} = -d_{4,5} = d_{5,6} = -d_{8,9}$; воздушный промежуток между КМЛ и КП $d_{2,3} = -d_{3,4} = d_{6,7} = -d_{7,8}$. Обозначим обратное значение радиуса r как $1/r = C$.

Используя условия нормировки, получаем:

$$h_1 = h_9; \quad h_2 = h_8; \quad h_3 = h_7 = 1; \quad h_4 = h_6;$$

$$P_1 = P_9^-; \quad P_2 = P_8^-; \quad P_3 = P_7; \quad P_4^- = P_6.$$

Поскольку поверхность 5 является автоколлимационной и ее сферическая аберрация равна нулю, то

$$P_5^- = 0;$$

$$n_1 = n'_2 = n_3 = 1; \quad n'_1 = n_2 = n'_5 = n_6 = n; \quad n'_6 = n_7 = 1;$$

$$n'_3 = n_4 = n'_7 = n_8 = n'_9 = -1; \quad n'_6 = n_7 = 1; \quad n'_4 = n_5 = n'_8 = n_9 = -n;$$

$$u_1 = u'_9; \quad u'_1 = u_2 = u'_8 = u_9; \quad u'_2 = u_3 = u'_7 = u_8;$$

$$u'_3 = u_4 = u'_6 = u_7; \quad u'_4 = u_5 = u'_5 = u_6.$$

Расстояние от т. O до поверхности 1 КМЛ

$$l_1 = \frac{h_1}{u_1}. \quad (2)$$

По параксиальной формуле

$$n_{i+1}u_{i+1} - n_i u_i = n'_i u'_i - n_i u_i = \frac{(n'_i - n_i) h_i}{r_i}, \quad (3)$$

тогда

$$r_1 = \frac{(n-1)h_1}{nu'_1 - u_1}; \quad r_2 = \frac{(n-1)h_2}{nu_2 - u'_2}; \quad r_4 = \frac{(n-1)h_4}{nu'_4 - u_4}; \quad r_5 = \frac{h_5}{u'_4}. \quad (4)$$

Для КП 3 запишем

$$n'_3 u'_3 - n_3 u_3 = \frac{(n'_3 - n_3) h_3}{r_3}, \quad (5)$$

при принятых условиях нормировки формулу (5) можно представить в виде

$$u'_3 + u_3 = 2C \Rightarrow u'_3 (1 + \beta) = 2C. \quad (6)$$

Высоты падения луча h_i определяют по формулам:

$$\begin{aligned} h_1 &= h_2 + d_{1,2}u'_1; & h_2 &= h_3 + d_{2,3}u'_2; \\ h_4 &= h_3 - d_{3,4}u'_3; & h_5 &= h_4 - d_{4,5}u'_4. \end{aligned} \quad (7)$$

Полагая, что КМЛ — бесконечно тонкая линза, получаем $h_1 = h_2$ и $h_4 = h_5$.

При условиях $r_1 = r_5$, $r_2 = r_4$ из формулы (4) следует, что

$$\begin{aligned} u'_4 &= \frac{1}{n} \left[\frac{h_4}{h_2} \left(nu'_1 - \frac{2C\beta}{1+\beta} \right) + \frac{2C}{1+\beta} \right]; \\ u'_1 &= u_1 - \frac{2C(n-1)}{n(1+\beta)} \left(\beta - \frac{h_2}{h_4} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Выражения для определения коэффициентов сферических aberrаций тонкой КМЛ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} P_1 &= \left(\frac{u'_1 - u_1}{\frac{1}{n'_1} - \frac{1}{n_1}} \right)^2 \left(\frac{u'_1}{n'_1} - \frac{u_1}{n_1} \right) = n \left(\frac{u'_1 - u_1}{n-1} \right)^2 (u'_1 - nu_1); \\ P_2 &= \left(\frac{u'_2 - u_2}{\frac{1}{n'_2} - \frac{1}{n_2}} \right)^2 \left(\frac{u'_2}{n'_2} - \frac{u_2}{n_2} \right) = \frac{n}{(n-1)^2} \left(\frac{2C\beta}{1+\beta} - u'_1 \right)^2 \left(\frac{2C\beta n}{1+\beta} - u'_1 \right); \\ P_3 &= \left(\frac{u'_3 - u_3}{\frac{1}{n'_3} - \frac{1}{n_3}} \right)^2 \left(\frac{u'_3}{n'_3} - \frac{u_3}{n_3} \right) = -2C^3 \left(\frac{\beta-1}{1+\beta} \right)^2; \\ P_4^- &= \left(\frac{u'_4 - u_4}{\frac{1}{n'_4} - \frac{1}{n_4}} \right)^2 \left(\frac{u'_4}{n'_4} - \frac{u_4}{n_4} \right) = -\frac{n}{(n-1)^2} \left(u'_4 - \frac{2C}{1+\beta} \right)^2 \left(u'_4 - \frac{2Cn}{1+\beta} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Учитывая принятые обозначения, формулу (1) можно записать так:

$$\begin{aligned} S_1 &= h_1P_1 + h_2P_2 + h_3P_3 + 2C^3K_3 + h_4P_4^- + h_5P_5^- + \\ &+ h_6P_6 + h_7P_7 + 2C^3K_7 + h_8P_8^- + h_9P_9^-. \end{aligned} \quad (10)$$

Полагая $S_1 = 0$ и применяя формулы (7)–(9) в выражении (10), после несложных преобразований получаем:

$$\varepsilon_3^2 = \frac{-1}{2C^3} (h_1P_1 + h_2P_2 + h_3P_3 + h_4P_4^- + h_5P_5^- + h_6P_6 + h_7P_7 + h_8P_8^- + h_9P_9^-). \quad (11)$$

Далее произвольно выбираем увеличение КП β и угол u_1 . Зная коническую константу K_3 и решив уравнение (11), по значению показателя преломления материала КМ можно найти $u_2, u_4', h_2, h_4, r_2, r_4$. Существуют марки оптического материала, имеющие показатель преломления $n = 1,4374\text{--}2,0033$. Подставляем полученные значения в формулы (4), (7), (8), чтобы снова найти u_1, h_1, h_5, r_1, r_5 . Решая уравнение (2), получаем значение воздушного расстояния l_1 .

В результате расчета определяем конструктивные параметры оптической системы. Затем в программе Zemax оптимизируем необходимые параметры для получения окончательных значений параметров оптической системы.

Примеры конкретных рабочих схем контроля. После расчета базовых конструктивных параметров КМЛ предлагаемым методом следует выполнить предварительную оптимизацию оптической схемы контроля в Zemax. Затем выбрать подходящий объектив с эталонной поверхностью, чтобы найти угол u_1 [11]. Далее необходимо провести окончательную оптимизацию с известным углом для требуемой схемы контроля. В результате расчета с использованием эталонной трансмиссионной сферы угла u_1 получены конструктивные параметры оптической схемы контроля телескопа Ричи — Кретъена 50 см в обсерватории Хоа Лак во Вьетнаме (табл. 1) и спутникового телескопа SNAP (табл. 2) [12, 13].

Таблица 1

Конструктивные параметры базовой оптической схемы контроля телескопа 50 см в обсерватории Хоа Лак (с использованием эталонной трансмиссионной сферы [14])

Радиус, мм	Толщина, мм	Показатель преломления n	Световой диаметр, мм	Коническая константа
–	974,540	1,000	–	–
760,000	–	–	87,664	
–	34,000	2,00069 (H-ZLAF90)	–	
750,000	–	–	87,209	
–	141,790	1,000	–	

Окончание табл. 1

Радиус, мм	Толщина, мм	Показатель преломления n	Световой диаметр, мм	Коническая константа
2294,109	–	–	99,771	–9,9379
–	–141,790	MIRROR	–	–
750,000	–	–	123,604	
–	–34,000	2,00069 (H-ZLAF90)	–	
760,000	–	–	129,332	
–	34,000	MIRROR	–	
750,000	–	–	123,604	
–	141,790	1,000	–	
2294,109	–	–	99,771	
–	–141,790	MIRROR	–	–
750,000	–	–	87,210	
–	–34,000	2,00069 (H-ZLAF90)	–	
760,000	–	–	87,664	
–	–974,540	–1,000	–	

Таблица 2

**Конструктивные параметры базовой оптической схемы контроля
спутникового телескопа SNAP
(с использованием эталонной трансмиссионной сферы [15])**

Радиус, мм	Толщина, мм	Показатель преломления n	Световой диаметр, мм	Коническая константа	
–	3038,730	1,000	–	–	
630,000	–	–	219,257		
–	19,650	2,00069 (H-ZLAF90)	–		
620,000	–	–	216,418		
–	134,667	1,000	–	–	
1098,9485	–	–	225,009		–1,8475
–	–134,667	MIRROR	–		
620,000	–	–	272,823		
–	–19,650	2,00069 (H-ZLAF90)	–		
630,000	–	–	281,146		
–	19,650	MIRROR	–		
620,000	–	–	272,823		
–	134,667	1,000	–		
1098,9485	–	–	225,009		–1,8475

Радиус, мм	Толщина, мм	Показатель преломления n	Световой диаметр, мм	Коническая константа
–	–134,667	MIRROR	–	–
620,000	–	–	216,418	
–	–19,650	2,00069 (H-ZLAF90)	–	
630,000	–	–	219,257	
–	–3038,730	–1,000	–	

Результаты проектирования оптической системы контроля телескопа Ричи — Кретьена 50 см в Хоа Лак обсерватории (Вьетнам) приведены на рис. 3.

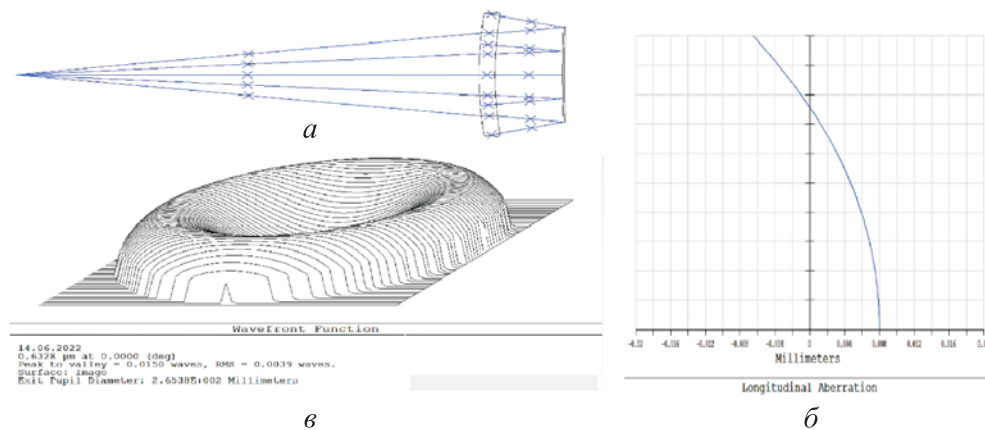


Рис. 3. Результаты проектирования оптической системы контроля телескопа Ричи — Кретьена 50 см в обсерватории Хоа Лак; ошибки волнового фронта $0,015\lambda$ (максимальное отклонение PV) и $0,0039\lambda$ (среднеквадратическое отклонение RMS):
a — оптическая схема; *б* — продольная сферическая аберрация;
в — функция волнового фронта

Результаты проектирования оптической системы контроля спутникового телескопа SNAP приведены на рис. 4.

Анализ разработанного метода контроля. Рассмотрим два случая (миниск концентрический и миниск с равными радиусами $R_1 = R_2$) при расчете параметров КМЛ, которые в первую очередь используются для изготовления любого оптического элемента. Для анализа таких случаев примем значения конструктивных параметров телескопа 50 см в обсерватории Хоа Лак в качестве КП и используем эталонную трансмиссионную сферу [14].

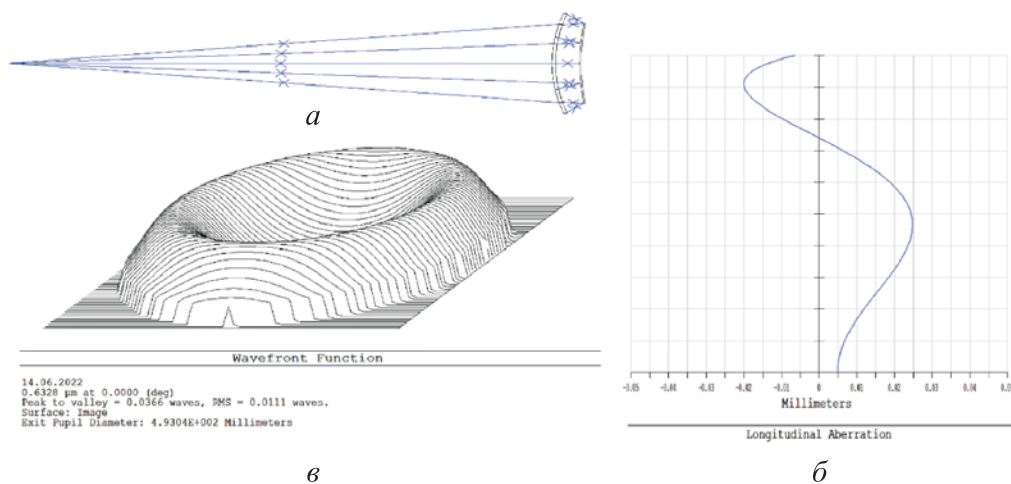


Рис. 4. Результаты проектирования оптической системы контроля спутникового телескопа SNAR; ошибки волнового фронта $PV = 0,0366\lambda$ и $RMS = 0,0111\lambda$:

a — оптическая схема; *б* — продольная сферическая аберрация;
в — функция волнового фронта

Из графиков на рис. 5, *a*, *б* следует, что в случае мениска с равными радиусами ($R_1 = R_2$) ошибка волнового фронта достигает малого значения ($RMS = 0,0011\lambda$) при показателе преломления $n = 1,517$ (H-K9L), в случае концентрического мениска значение ошибки волнового фронта будет минимальным ($RMS = 0,0002\lambda$) при показателе преломления $n = 2,0033$ (H-ZLAF92).

Кроме того, ошибка волнового фронта сильно зависит от толщины КМЛ, т. е. чем больше толщина КМЛ, тем меньше ошибка волнового фронта. Следовательно, при расчете конструктивных параметров КМЛ необходимо найти оптимальную толщину $d_{1,2}$ КМЛ для удовлетворения требованиям к допустимой ошибке волнового фронта и экономичности.

Описание оптической схемы интерферометра Физо. Для реализации предложенного метода контроля можно использовать интерферометр Физо с подходящим объективом с эталонной поверхностью, оптическая схема которого приведена на рис. 6.

Волновой фронт от КП, проходящий через эталонную поверхность, попадает в измерительную ветвь. На пути пучка световых лучей, который формируется в результате отражения от первой поверхности КМЛ падающего на нее пучка световых лучей и его отражения от светоделительного кубика 3, установлен блок регистрации с линзой Бертрана 7 и фото-

приемной матрицей 8. Линза Бертрана формирует изображение оправы КП без искажений на матрице для сопоставления местной ошибки поверхности с соответствующей координатой на зеркале.

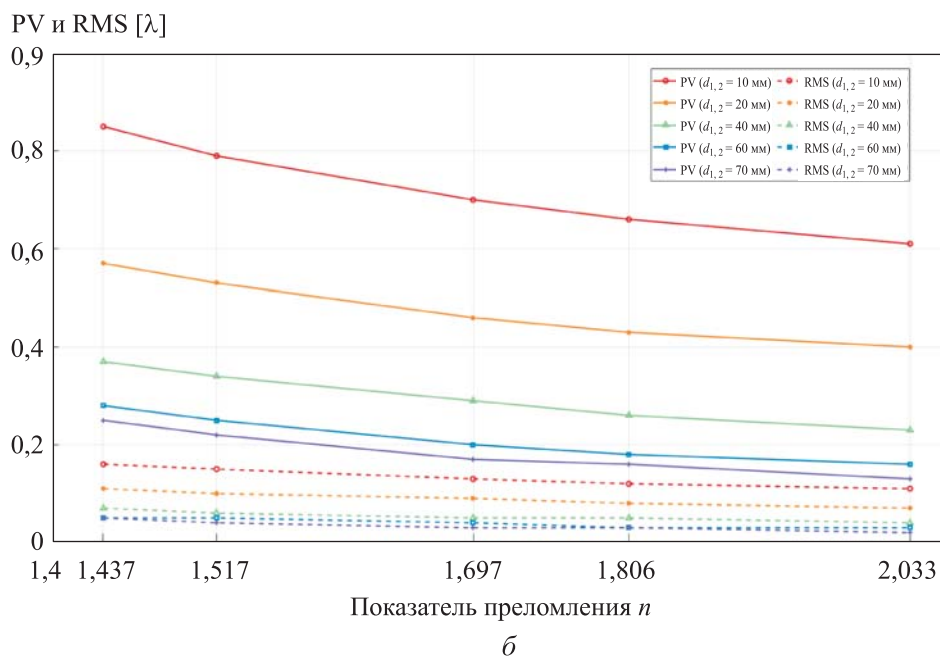
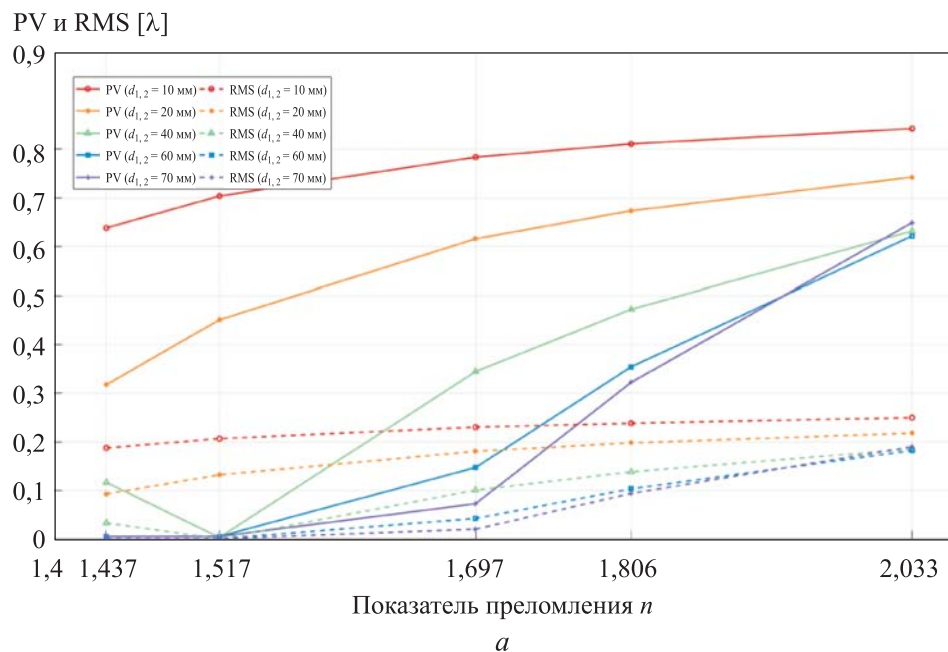


Рис. 5. Графики зависимостей ошибки PV, RMS волнового фронта от показателя преломления n и толщины КМЛ $d_{1,2}$ при $R_1 = R_2$ (а) и $R_1 = R_2 + d_{1,2}$ (б)

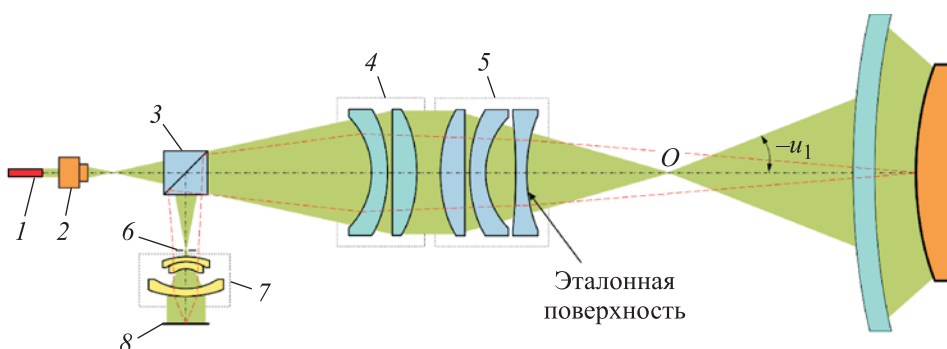


Рис. 6. Принципиальная оптическая схема интерферометра Физо:

1 — монохроматический He-Ne-лазер; 2 — микрообъектив; 3 — светоделительный кубик; 4 — коллимирующий объектив; 5 — эталонный объектив; 6 — пространственный фильтр; 7 — объектив для регистрации интерферограммы (линза Бертрана); 8 — фотоприемная матрица блока регистрации

В результате переналожения пучков световых лучей, выходящих из эталонной и рабочей ветвей, возникает двухлучевая интерференция соответствующих им волн. Таким образом, образованная интерференционная картина регистрируется фотоприемной матрицей блока регистрации; ход лучей в интерферометре Физо с эталонным объективом для контроля выпуклых зеркал показан на рис. 7.

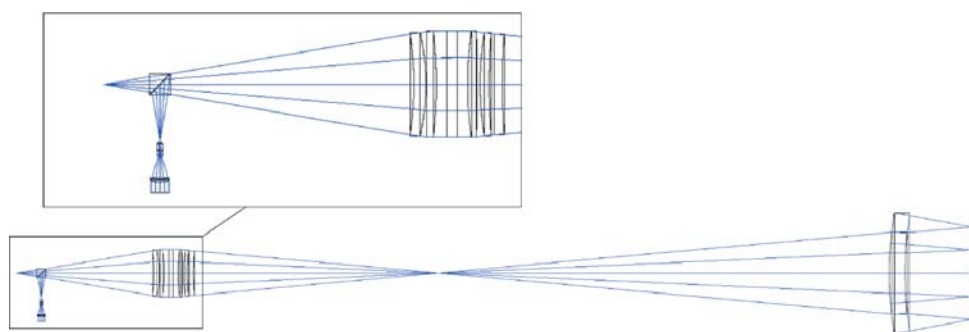


Рис. 7. Ход лучей в интерферометре Физо с эталонным объективом для контроля выпуклых зеркал

Заключение. Разработанный современный метод позволяет использовать базовые знания по основам теории аббераций третьего порядка при расчете корректора для прецизионного контроля гиперболической поверхности с большой апертурой. Его можно применять для различных асферических поверхностей, особенно для выпуклых асферических поверхностей второго порядка. Отличительной особенностью схемы кон-

троля является использование единственного вспомогательного мениска с полупрозрачным покрытием на выпуклой поверхности, следовательно, этот метод не требует применения дополнительных крупногабаритных высококачественных оптических деталей и улучшения способности коррекции. Сферическая выпуклая поверхность КМЛ должна быть изготовлена с предельно возможной точностью и аттестована. Полученное минимальное значение остаточных волновых aberrаций в измерительной ветви позволит обеспечить измерение формы КП с достаточной точностью и даст вполне реальные возможности для практической реализации. В настоящее время проводятся исследования влияния ошибки изготовления КМЛ и линзы Бертрана на результаты измерения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пуряев Д.Т., Дружин В.В., Абдулкадыров М.А. и др. Компактный лазерный интерферометр для многоцелевых оптических измерений в видимой и ИК-областях спектра. *Контенант*, 2020, т. 19, № 2, с. 1–5.
- [2] Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М., Машиностроение, 1976.
- [3] Malacara D. *Optical shop testing*. New York, John Wiley & Sons, 2007.
- [4] Семенов А.П., Патрикеев В.Е., Пуряев Д.Т. и др. Интерферометр для контроля выпуклых гиперболоидов. *Контенант*, 2018, т. 17, № 2, с. 89–93.
- [5] 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.
- [6] Полещук А.Г. Формирование асферических волновых фронтов с помощью синтезированных голограмм. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2013, т. 5, № 3, с. 11–14.
- [7] Percino-Zacarias M.E., Cordero-Da'vila A. N-Hindle-sphere arrangement with an exact ray trace for testing hyperboloid convex mirrors. *Appl. Opt.*, 1999, vol. 38, no. 28, pp. 6050–6054. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.38.006050>
- [8] 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>
- [9] Полещук А.Г., Хомутов В.Н., Маточкин А.Е. и др. Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей. *Фотоника*, 2016, № 4, с. 38–50. DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.58.4.38.50>
- [10] Qi L., Zheng L., Ye L., et al. Convex aspheric surface testing method using an autocollimation lens. *Acta Optica Sinica*, 2020, vol. 40, no. 8, art. 0822001. DOI: <https://doi.org/10.3788/aos202040.0822001>
- [11] Ye X., Han C., Han S., et al. Intelligent selection of industrial transmission sphere for interferometer. *Proc. IEEE ИТОЕС*, 2017, pp. 86–90. DOI: <https://doi.org/10.1109/ИТОЕС.2017.8122385>

[12] Thao N.T., Dung M.T., Loc P.V., et al. The 50 cm telescope of Hoa Lac observatory: an introduction. *VJSTE*, 2019, vol. 61, no. 4, pp. 14–28.

DOI: [https://doi.org/10.31276/VJSTE.61\(4\).14-28](https://doi.org/10.31276/VJSTE.61(4).14-28)

[13] Michael L.L., Carl W.A., Greg A., et al. SNAP telescope. *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4849.

DOI: <https://doi.org/10.1117/12.460074>

[14] MLOPTIC transmission spheres. *mloptic.com: веб-сайт*.

URL: <https://mloptic.com/wp-content/uploads/2022/01/Transmission-Spheres.pdf> (дата обращения: 15.06.2022).

[15] Metrology for optics redefined. *yuanch.com: веб-сайт*.

URL: http://www.yuanch.com/pdf/19_XO-Catalogue_2020N_S.pdf (дата обращения: 15.06.2022).

Нгуен Суан Чиен — студент магистратуры 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:

Нгуен С.Ч., Дружин В.В. Интерференционный метод контроля формы выпуклых асферических поверхностей с помощью концентрической менисковой линзы. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 2 (143), с. 4–19. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-2-4-19>

**INTERFEROMETRIC METHOD TO CONTROL
THE CONVEX ASPHERICAL SURFACE SHAPE
USING A CONCENTRIC MENISCUS LENS**

X.C. Nguyen

chiennx.htbm@gmail.com

V.V. Druzhin

vlad.druzhin@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Convex aspherical surfaces are being increasingly used as elements of the high-precision optical devices for various purposes. Complexity in such surfaces manufacture is because the existing methods of their shape control with the optical accuracy of about 20–30 nm require introduction of the auxiliary reference optical elements, which dimensions are several

Keywords

Aspherical mirrors, convex aspherical surfaces, optical measurements, optical control, interferometers

times larger than those of the controlled part are. The paper proposes the autocollimation control method using a concentric meniscus lens with dimensions slightly exceeding the dimensions of the controlled part. Results of calculating the control circuit design parameters are presented based on the theory of the third-order aberrations. Effect of the refractive index and thickness of a concentric meniscus lens on the maximum and root-mean-square deviations of the surface shape with various requirements to concentric meniscus lens radii was considered, and the developed scheme simulation in the Zemax software was also proposed. The Fizeau interferometer optical scheme was described using a lens with the reference surface to implement the developed method. Applied research was carried out to control the secondary mirrors of the Ritchie — Chrétien telescope at the Hoa Lak Observatory (Vietnam) and of the SNAP satellite telescope

Received 02.09.2022

Accepted 30.03.2023

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Puryaev D.T., Druzhin V.V., Abdulkadyrov M.A., et al. Compact laser interferometer for optical measurements in visible and infrared (IR) spectrum range. *Kontenant* [Contentant], 2020, vol. 19, no. 2, pp. 1–5 (in Russ.).
- [2] Puryaev D.T. *Metody kontrolya opticheskikh asfericheskikh poverkhnostey* [Methods for control of optical aspherical surfaces]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976.
- [3] Malacara D. *Optical shop testing*. New York, John Wiley & Sons, 2007.
- [4] Semenov A.P., Patrikeev V.E., Puryaev D.T., et al. Interferometer for control of convex hyperboloids. *Kontenant* [Contentant], 2018, vol. 17, no. 2, pp. 89–93 (in Russ.).
- [5] Puryaev D.T., Druzhin V.V., Semenov A.P., et al. Interferometer for convex hyperboloid testing. *Kontenant* [Contentant], 2020, vol. 19, no. 2, pp. 6–11 (in Russ.).
- [6] Poleshchuk A.G. Formation of aspherical wavefronts by means of computer generated holograms. *Interekspo Geo-Sibir*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 11–14 (in Russ.).
- [7] Percino-Zacarias M.E., Cordero-Da'vila A. N-Hindle-sphere arrangement with an exact ray trace for testing hyperboloid convex mirrors. *Appl. Opt.*, 1999, vol. 38, no. 28, pp. 6050–6054. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.38.006050>
- [8] 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>
- [9] Poleshchuk A.G., Khomutov V.N., Matochkin A.E., et al. Laser interferometers for optical surface testing. *Fotonika* [Photonics Russia], 2016, no. 4, pp. 38–50 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.58.4.38.50>

- [10] Qi L., Zheng L., Ye L., et al. Convex aspheric surface testing method using an auto-collimation lens. *Acta Optica Sinica*, 2020, vol. 40, no. 8, art. 0822001.
DOI: <https://doi.org/10.3788/aos202040.0822001>
- [11] Ye X., Han C., Han S., et al. Intelligent selection of industrial transmission sphere for interferometer. *Proc. IEEE ITOEC*, 2017, pp. 86–90.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ITOEC.2017.8122385>
- [12] Thao N.T., Dung M.T., Loc P.V., et al. The 50 cm telescope of Hoa Lac observatory: an introduction. *VJSTE*, 2019, vol. 61, no. 4, pp. 14–28.
DOI: [https://doi.org/10.31276/VJSTE.61\(4\).14-28](https://doi.org/10.31276/VJSTE.61(4).14-28)
- [13] Michael L.L., Carl W.A., Greg A., et al. SNAP telescope. *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4849.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.460074>
- [14] MLOPTIC transmission spheres. *mloptic.com: website*.
Available at: <https://mloptic.com/wp-content/uploads/2022/01/Transmission-Spheres.pdf> (accessed: 15.06.2022).
- [15] Metrology for optics redefined. *yuanch.com: website*.
Available at: http://www.yuanch.com/pdf/19_XO-Catalogue_2020N_S.pdf (accessed: 15.06.2022).

Nguyen X.C. — Master's Degree 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:

Nguyen X.C., Druzhin V.V. Interferometric method to control the convex aspherical surface shape using a concentric meniscus lens. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 2 (143), pp. 4–19 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-2-4-19>