Научная статья
Research Article

ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2024. Том 91. № 11. С. 43–53
OPTICHESKII ZHURNAL. 2024. V. 91. № 11. P. 43–53

Оптический журнал

Расчет, проектирование и производство оптических систем
Calculation, design and manufacture of optical systems

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-11-43-53
УДК 535.8

Гартманометр и интерферометр Физо: сравнительный анализ устройств в задачах контроля качества оптических поверхностей

И. В. Галактионов[1]✉, А. Н. Никитин[2], Ю. В. Шелдакова[3], В. В. Топоровский[4], С. Х. Абдулразак[5], А. В. Кудряшов[6]

[1, 2, 3, 4, 6]Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия
[5]Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
[6]Московский политехнический университет, Москва, Россия

[1]galaktionov@activeoptics.ru https://orcid.org/0000-0002-8993-3741
[2]nikitin@activeoptics.ru https://orcid.org/0000-0002-6636-905X
[3]sheldakova@nightn.ru https://orcid.org/0000-0002-5160-1194
[4]topor@activeoptics.ru https://orcid.org/0000-0002-8172-5171

Аннотация

Предмет исследования. Оптомеханическое устройство как альтернатива интерферометру Физо для задач контроля качества оптических поверхностей. **Цель работы.** Разработка и исследование метрологического устройства для измерения плоскостности оптической поверхности. Сравнение результатов измерений, полученных при использовании разработанного устройства и интерферометра Физо. **Метод.** Измерение волнового фронта излучения, отраженного от исследуемой оптической поверхности, с помощью датчика Шака–Гартмана. **Основные результаты.** В результате исследований было разработано принципиально новое устройство, названное гартманометром. Представлен метод его калибровки, а также приведено сравнение результатов измерения тестовой оптической поверхности с использованием разработанного устройства и классического интерферометра Физо. Общая амплитуда искажений волнового фронта, измеренная с помощью интерферометра Физо, составила 0,127 мкм (среднеквадратическое отклонение 0,022 мкм), с помощью гартманометра — 0,131 мкм (среднеквадратическое отклонение 0,024 мкм). **Практическая значимость.** Разработанное устройство может служить более надежной и бюджетной альтернативой интерферометру Физо в задачах контроля качества оптических поверхностей.

Ключевые слова: гартманометр, интерферометр Физо, датчик волнового фронта Шака–Гартмана, измерение волнового фронта, интерферометрия

Ссылка для цитирования: Галактионов И.В., Никитин А.Н., Шелдакова Ю.В., Топоровский В.В., Абдулразак С.Х., Кудряшов А.В. Гартманометр и интерферометр Физо: сравнительный анализ устройств в задачах контроля качества оптических поверхностей // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 11. С. 43–53. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-43-53

Коды OCIS: 120.2650, 120.3930, 120.5050

Hartmannometer and Fizeau interferometer: Comparative analysis of the devices for optical surface test

I. V. Galaktionov[1]✉, A. N. Nikitin[2], J. V. Sheldakova[3], V. V. Toporovsky[4], S. Kh. Abdulrazak[5], A. V. Kudryashov[6]

[1, 2, 3, 4, 6]Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[5]Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
[7]Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

[1]galaktionov@activeoptics.ru https://orcid.org/0000-0002-8993-3741
[2]nikitin@activeoptics.ru https://orcid.org/0000-0002-6636-905X
[3]sheldakova@nightn.ru https://orcid.org/0000-0002-5160-1194
[4]topor@activeoptics.ru https://orcid.org/0000-0002-8172-5171

Abstract

Subject of study. Opto-mechanical device as an alternative to the Fizeau interferometer for optical quality test. **Aim of study.** Development and research of the metrological device for measurement of the optical surface flatness. Comparison of the results to ones obtained by the Fizeau interferometer. **Method.** Measurements of wavefront of a radiation reflected from the optical surface under test by means of Shack–Hartmann wavefront sensor. **Main results.** As a result of the research, a new optical metrological device called a Hartmanometer was developed. A method for its calibration is presented, and a comparison of the results of measuring a test optical surface using the developed device and a classic Fizeau interferometer is given. The total amplitude of wave front distortions measured using a Fizeau interferometer was 0.127 μm (standard deviation 0.022 μm), using a hartmanometer — 0.131 μm (standard deviation 0.024 μm). **Practical significance.** The newly developed device can serve as a robust alternative to the conventional Fizeau interferometer in the tasks of optical surface testing.

Keywords: Hartmannometer, Fizeau interferometer, Shack–Hartmann wavefront sensor, wavefront sensing, interferometry

For citation: Galaktionov I.V., Nikitin A.N., Sheldakova J.V., Toporovsky V.V., Abdulrazak S.Kh., Kudryashov A.V. Hartmannometer and Fizeau interferometer: Comparative analysis of the devices for optical surface test [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 11. P. 43–53. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-43-53

OCIS codes: 120.2650, 120.3930, 120.5050

ВВЕДЕНИЕ

Применение интерферометра Физо [1, 2] — наиболее распространенный метод контроля точности изготовления оптических поверхностей деталей и систем. Интерферометр Физо является разновидностью многолучевого интерферометра, в котором интерференция происходит между двумя отражающими поверхностями. На рис. 1 представлена принципиальная схема интерферометра Физо.

Основной проблемой в оптической схеме интерферометра представляется эталонная поверхность, которая должна быть очень высокого качества [3]. Проблема усугубляется, когда появляется необходимость тестировать широкоапертурные оптические детали (200 мм и более), например деформируемые зеркала [4, 5], поскольку, чем больше апертура образца, тем сложнее и дороже изготовить эталонную поверхность с требуемой плоскостностью. В классическом интерферометре существует также проблема измерения малых линз с большой кривизной поверхности, когда в апертуру измерительного прибора попадает лишь часть отраженного от линзы светового пучка. Для ее решения требуется использовать специализированные насадки на интерферометр.

С целью решения обозначенных выше задач было разработано и исследовано метрологическое устройство на основе датчика волнового фронта (ВФ) Шака–Гартмана [6–13], названное гартманометром. Гартманометр позволяет восстанавливать ВФ (и интерференционную картину) падающего излучения

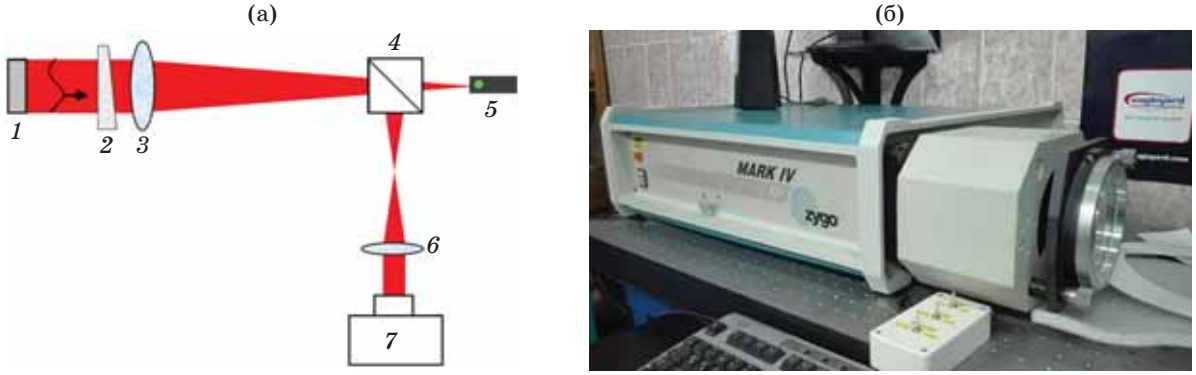


Рис. 1. Схема интерферометра Физо (а). *1* — тестируемая оптическая поверхность, *2* — эталонная поверхность, 3 — коллимирующая линза, *4* — светоделительная пластина, *5* — гелий-неоновый лазер, *6* — сопрягающая линза, *7* — видеокамера. Фотография интерферометра *Zygo*, используемого для тестирования оптических поверхностей в рамках настоящей работы (б)

Fig. 1. (a) Fizeau interferometer scheme. (*1*) Optical surface under test, (*2*) reference optical surface, (*3*) collimating lens, (*4*) beam splitter, (*5*) helium-neon laser, (*6*) imaging lens, (*7*) video camera. (б) Photo of a Zygo interferometer used to test optical surfaces

и при этом не требует наличия высококачественной эталонной оптической поверхности в каждом конкретном образце прибора. Для этого в схему классического интерферометра Физо были внесены следующие изменения: исключен оптический клин с эталонной поверхностью, видеокамера заменена на датчик ВФ Шака–Гартмана, а высококогерентный гелий-неоновый лазер заменен на одномодовый диодный лазер (длина волны излучения 0,65 мкм) с волоконным выводом. Разумеется, для первоначальной настройки прибора используется широкоапертурная эталонная поверхность, но она может быть одна на лабораторию, поскольку в комплект поставки прибора не входит, чем и упрощает, и делает более доступной по стоимости его конструкцию. Коллимирующая линза большой апертуры присутствует и в той, и в другой конфигурациях, но ее изготовление не сопряжено с такими трудностями, как изготовление плоской эталонной поверхности. При изготовлении датчика Шака–Гартмана (ДШГ) записывается так называемый лабораторный опорный ВФ. Полученное изображение поля фокальных пятен (гартманограмма), сформированных линзовым растром, прописывается как опорный ВФ (ОВФ), относительно которого затем проводятся все измерения. Для этой процедуры, конечно же, используется эталонная поверхность.

Решение проблемы измерения поверхностей с большой кривизной заключается в использовании так называемого калибола[1] [14]. Это устройство имеет идеальную сферическую поверхность и используется для записи ОВФ. Отражение, получаемое в результате установки калибола под сходящийся ВФ и максимально совпадающее с плоским ВФ, будет являться ОВФ при тестировании сферических поверхностей. И в данном случае преимущество использования ДШГ заключается в том, что программное обеспечение по измерению ВФ даже с достаточно большой кривизной можно легко модифицировать, имея необходимую базу для этого, например, зная предельно допустимую кривизну ВФ, можно изменить алгоритм определения сетки ОВФ, учитывая тот факт, что фокальные пятна, формируемые отраженным от поверхности с большой кривизной пучком, будут сильно смещаться относительно опорных положений.

Целью настоящей работы являются разработка и исследование метрологического устройства для измерения плоскостности оптической поверхности, сравнение результатов измерений, полученных при использовании разработанного устройства и интерферометра Физо.

[1] От англ. *calibrating ball.*

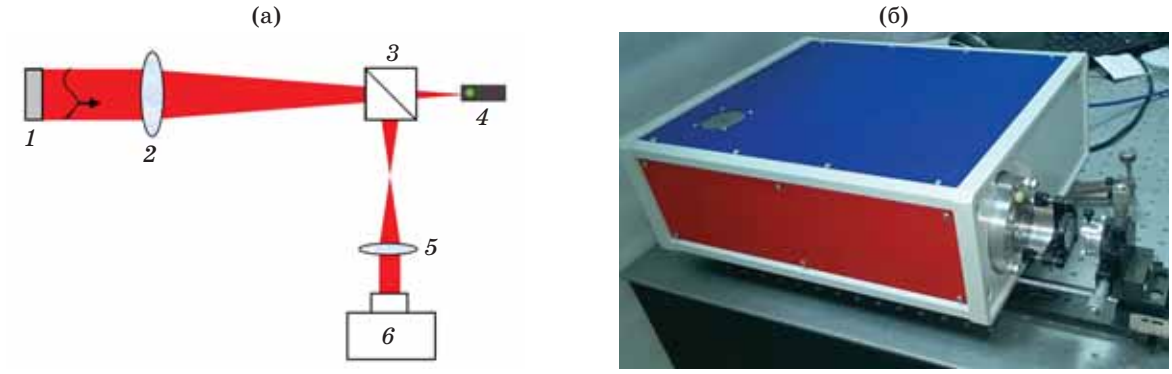


Рис. 2. Оптическая схема изготовленного гартманометра (а) и его фотография (б). *1* — тестируемая оптическая поверхность, *2* — коллимирующая линза, *3* — светоделительная пластина, *4* — диодный лазер, *5* — сопрягающая линза, *6* — ДШГ

Fig. 2. (a) Optical scheme of the developed Hartmannometer and (б) its photo. (*1*) Optical surface under test, (*2*) collimating lens, (*3*) beam splitter, (*4*) diode laser, (*5*) imaging lens, (*6*) Shack–Hartmann sensor

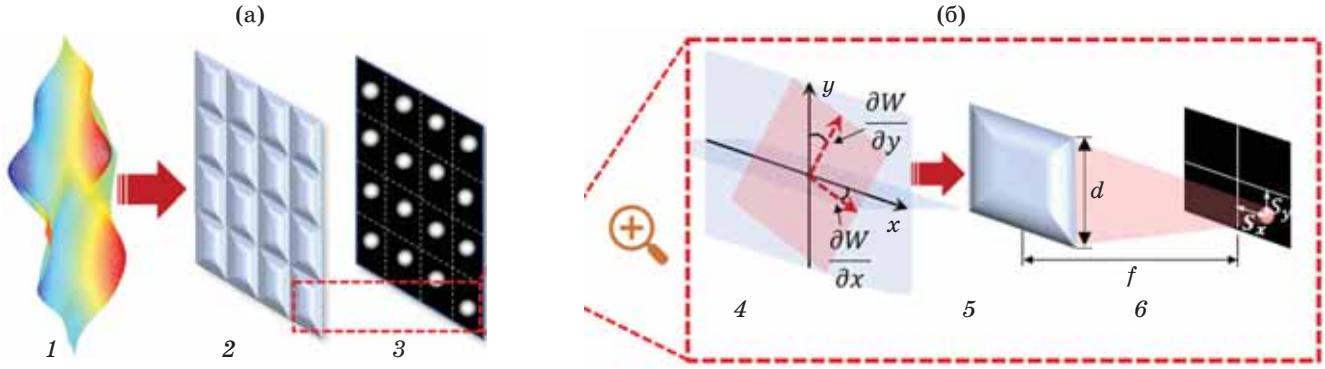


Рис. 3. Формирование набора фокальных пятен с помощью микролинзового растра в ДШГ (а) и вычисление производной ВФ W путем измерения смещений S_x, S_y фокального пятна относительно центра субапертуры в плоскости матрицы (б). *1* — ВФ, *2* — массив микролинз, *3* — матрица видеокамеры; *4* — ВФ W, *5* — микролинза, *6* — субапертура матрицы видеокамеры

Fig. 3. (a) Focal spots formation by Shack–Hartmann wavefront sensor and (б) calculation of wavefront W derivatives by measuring focal spots displacements S_x, S_y. (*1*) Wavefront, (*2*) microlens array, (*3*) video camera matrix; (*4*) wavefront W, (*5*) microlens, (*6*) subaperture on a video camera matrix

Принципиальная оптическая схема нового устройства, названного гартманометром, а также его фотография, представлены на рис. 2. В работе приводятся описание разработанного устройства и методика его калибровки.

ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШАКА–ГАРТМАНА

Принцип измерения ВФ с помощью ДШГ заключается в следующем [14]. Волновой фронт делится на большое число субапертур с помощью микролинзового растра, представляющего собой тонкую плоскую пластину с вытравленной на ней сеткой микролинз диаметром 100–300 мкм каждая. Излучение, прошедшее сквозь микролинзы растра, формирует в плоскости матрицы картину из фокальных пятен (рис. 3).

Поскольку размер микролинзы достаточно мал, считается, что в пределах одной микролинзы ВФ плоский и единственная присутствующая в нем аберрация — это наклон по двум координатам. В случае если наклон нулевой, т.е. ВФ в пределах субапертуры параллелен плоскости микролинзы, то излучение сфокусируется в центре соответствующей субапертуры матрицы. Если же в пределах микролинзы ВФ имеет наклоны, то фокальное пятно на ма-

трице будет смещено относительно центра субапертуры пропорционально наклонам. Иными словами, измерив смещения фокального пятна S_x и S_y по осям X и Y соответственно, можно определить значения частных производных ВФ W в пределах одной субапертуры

$$\begin{Bmatrix} \partial W(x,y)/\partial x \\ \partial W(x,y)/\partial y \end{Bmatrix} = \frac{1}{f}\begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где $\partial W(x, y)/\partial x$, $\partial W(x, y)/\partial y$ — частные производные ВФ, f — фокусное расстояние микролинзы.

С другой стороны, для графического и аналитического представлений поверхность ВФ можно аппроксимировать полиномами, например, би-сплайнами [16] или традиционно используемыми в оптике полиномами Цернике [17, 18]. Они являются ортогональными в круге единичного радиуса и задаются аналитически в полярных координатах.

Тогда произвольный ВФ можно представить в виде разложения по полиномам Цернике

$$W = \sum_{i=0}^{N} a_i Z_i(x,y) = \sum_{n=0}^{k}\sum_{m=0}^{n} a_{nm} Z_n^l(\rho,\vartheta), \quad (2)$$

где a_{nm} — коэффициент при полиноме Цернике, показывающий значение соответствующей аберрации, N — количество используемых полиномов Цернике, $l = n - 2m$.

Зная аналитическое представление полиномов, можно вычислить их частные производные $\partial W(x, y)/\partial x$, $\partial W(x, y)/\partial y$

$$\begin{Bmatrix} \partial W(x,y)/\partial x \\ \partial W(x,y)/\partial y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i}^{N} a_i \partial Z_i(x,y)/\partial x \\ \sum_{i}^{N} a_i \partial Z_i(x,y)/\partial y \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

Таким образом, с одной стороны производные ВФ $\partial W(x, y)/\partial x$, $\partial W(x, y)/\partial y$ можно выразить аналитически через полиномы Цернике, а с другой — значения производных можно вычислить из смещений фокальных пятен S_x, S_y на матрице

$$\begin{Bmatrix} \partial W(x,y)/\partial x \\ \partial W(x,y)/\partial y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i}^{N} a_i \partial Z_i(x,y)/\partial x \\ \sum_{i}^{N} a_i \partial Z_i(x,y)/\partial y \end{Bmatrix} = \frac{1}{f}\begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

В результате получается переопределенная система линейных алгебраических уравнений с неизвестными коэффициентами разложения a_i, для решения которых и нахождения коэффициентов a_i использовался метод наименьших квадратов [19].

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН ГАРТМАНОМЕТРА

Погрешность измерений гартманометра зависит от погрешности измерений лежащего в его основе ДШГ, которая в свою очередь зависит от погрешности расчета смещений фокальных пятен. Погрешность определения центров фокальных пятен зависит от минимального смещения фокального пятна $S_{\min}$, которое может быть зарегистрировано с помощью камеры: $\Delta\varphi_{\min} = S_{\min}/f_1 d_1$, где f_1, d_1 — фокусное расстояние и апертура одной микролинзы линзового растра (рис. 4).

Согласно ранее проведенным статистическим исследованиям [20], погрешность определения центра фокального пятна составляет 0,05 от размера пиксела матрицы видеокамеры. То есть, если смещение центра фокального пятна на двух последовательных кадрах составляет более 0,05 пиксела, датчик может его измерить.

Динамический диапазон гартманометра — это максимальная амплитуда отклонений ВФ,

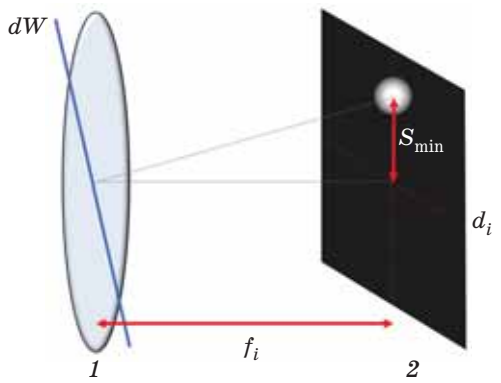


Рис. 4. Схема определения погрешности измерения центра фокального пятна. *1* — микролинза, *2* — субапертура на матрице видеокамеры. Пояснения в тексте

Fig. 4. Scheme for calculation of deviation of focal spot centroid definition. (*1*) Microlens, (*2*) subaperture on a video camera matrix. Explanations are in the text

при которой все фокальные пятна, сформированные микролинзовым растром, не покидают пределов соответствующих субапертур. Для аберрации наклона динамический диапазон можно оценить по следующей формуле: $\Delta\varphi_{\min} = 0{,}5(d_l - R_s)D/f_l$, где D — апертура лазерного пучка в плоскости матрицы, R_s — радиус дифракционного пятна, рассчитываемый по формуле $R_s = f_l\lambda/d_l$, λ — длина волны излучения.

Динамический диапазон гартманометра обратно пропорционален погрешности измерений. Он может варьироваться в широких пределах (до сотен длин волн) путем выбора линзового растра с соответствующим фокусным расстоянием.

КАЛИБРОВКА ГАРТМАНОМЕТРА

Погрешность расчета локальных производных ВФ сильно зависит от погрешности определения параметра f_l — реального расстояния между линзовым растром и плоскостью приемной площадки видеокамеры. У каждого линзового растра есть номинальное фокусное расстояние, однако, вследствие технологических особенностей установки и крепления линзового растра на видеокамеру, реальное расстояние, как правило, отличается от номинального. Этот параметр критически важен и должен определяться с высокой точностью с целью устранения систематической погрешности в последующих вычислениях.

Нами предложен метод калибровки параметра f_l [21]. Датчик Шака–Гартмана устанавливался в оправу с прецизионным управлением по углам. Апертура ДШГ засвечивалась коллимированным лазерным пучком, ось которого совпадала с осью датчика. В таком положении записывался исходный ВФ. Далее оправа поворачивалась на фиксированный угол, вследствие чего фокальные пятна на датчике смещались. Выполнялось следующее измерение ВФ. Эта процедура повторялась до тех пор, пока фокальные пятна не начинали выходить за границы сетки ОВФ. Затем выполнялась пакетная обработка результатов измерений и строилась калибровочная кривая, из которой рассчитывалось реальное расстояние между линзовым растром и приемной площадкой камеры. Оптическая схема процесса калибровки представлена на рис. 5.

В результате серии измерений ВФ при разных наклонах строилась калибровочная кривая, согласно которой выполнялся расчет параметра f_l.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕСТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

С целью сравнения результатов работы интерферометра Физо и гартманометра была проведена серия измерений ВФ оптических поверхностей различных апертуры (от 10 до 100 мм) и плоскостности. В качестве примера далее приводится результат измерений ВФ оптической детали апертурой 35 мм с некоторой ненулевой кривизной отражающей поверхности. Номинальное фокусное расстояние линзового растра используемого гартманометра

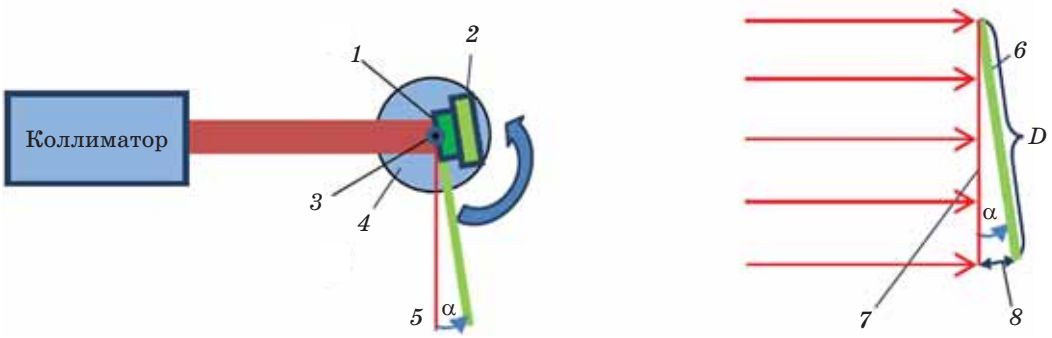


Рис. 5. Схема калибровки гартманометра. *1* — плоскость линзового растра, *2* — ДШГ, *3* — коллимированный пучок, *4* — ось вращения, *5* — оправа с прецизионным управлением по углам, *6* — ДШГ, *7* — падающий ВФ, *8* — реальная амплитуда ВФ

Fig. 5. Hartmannometer calibration scheme. (*1*) Lenslet array plane, (*2*) Shack–Hartmann sensor, (*3*) collimated beam, (*4*) rotation axis, (*5*) mount with high precision angular adjustment, (*6*) Shack–Hartmann sensor, (*7*) incident wavefront, (*8*) real amplitude of a wavefront

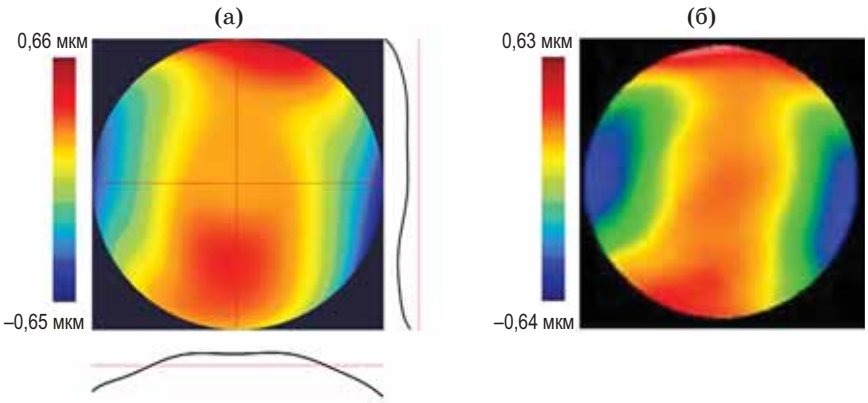


Рис. 6. Результаты измерения тестовой оптической поверхности, полученные при использовании гартманометра (а) и интерферометра Физо (б)

Fig. 6. Measurements results of the test optical surface obtained using (а) a Hartmanometer and (б) a Fizeau interferometer

Таблица 1. Коэффициенты при полиномах Цернике, полученные в результате измерения ВФ при использовании интерферометра Физо и гартманометра

Table 1. Zernike polynomials coefficients of the obtained from wavefront measurements using a Fizeau interferometer and a Hartmanometer

Номер полинома Цернике	Значение коэффициента, мкм	
	гартманометр	интерферометр Физо
1	0,036	0,034
2	0,063	0,063
3	–0,016	–0,015
4	–0,045	–0,047
5	–0,015	–0,016
6	–0,002	–0,002
7	–0,013	–0,014
8	0	0
9	–0,003	–0,002
10	0,002	0,002
11	–0,001	–0,001
12	–0,003	–0,001
13	–0,003	–0,003
14	–0,002	–0,002
15	0,002	–0,001
16	–0,002	–0,002
17	0	0,001
18	0	0,002
19	0,002	0,004
20	0,001	0,002
21	0,001	0,003
22	–0,001	–0,001
23	0	0,002
24	–0,003	–0,001

составляло 12 мм, реально измеренное фокусное расстояние — 11,57 мм, диаметр микролинзы — 200 мкм. Результирующие фазовые карты, полученные при использовании интерферометра Физо и гартманометра представлены на рис. 6, значения соответствующих коэффициентов при полиномах Цернике — в табл. 1.

Общая амплитуда искажений ВФ, измеренная с помощью интерферометра Физо, составила 0,127 мкм (СКО = 0,022 мкм). Гартманометр показал амплитуды отклонений 0,131 мкм (СКО = 0,024 мкм). Видно, что коэффициенты при полиномах Цернике, равно как и амплитуды и СКО ВФ различаются несущественно при измерении плоскостности детали двумя разными приборами.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГАРТМАНОМЕТРА

В процессе исследования работы гартманометра был выявлен эффект изменения амплитуды ВФ при изменении размера области расчетов. В частности, при уменьшении диаметра круговой маски (далее — апертуры) в некоторых случаях проявлялся эффект увеличения амплитуды отклонений ВФ, хотя из общих соображений с уменьшением апертуры она должна уменьшаться.

Этот эффект связан с особенностями аппроксимации ВФ, поскольку полиномы Цернике являются гладкими функциями и на большой апертуре они «разглаживают» локальные

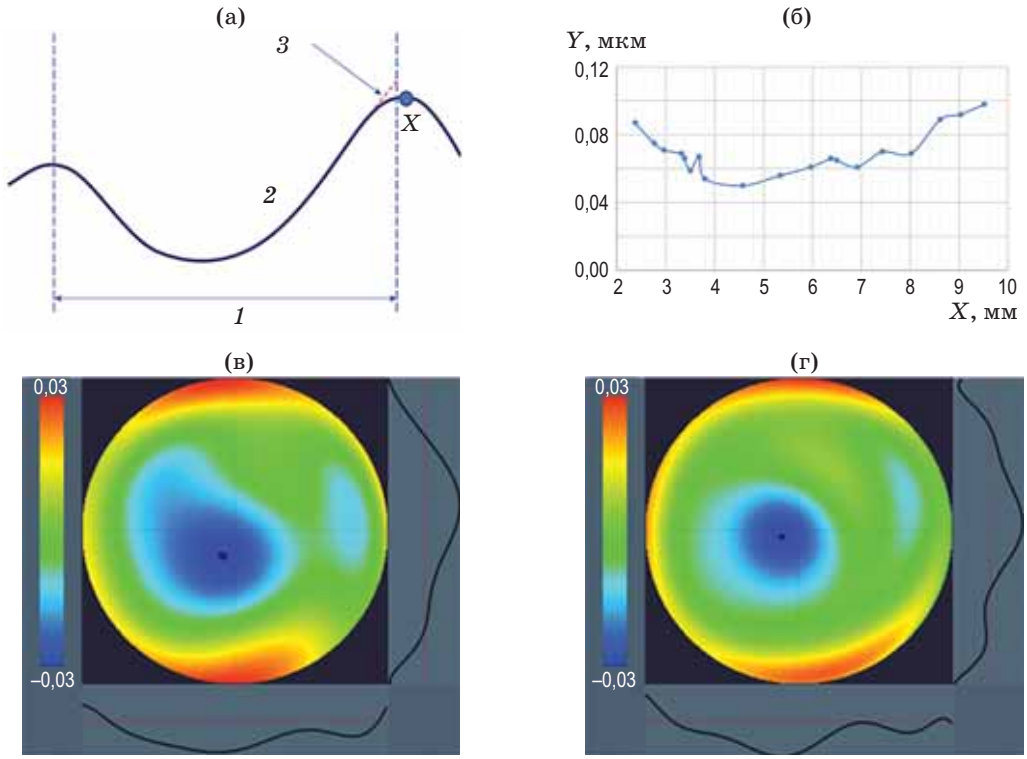


Рис. 7. Результат аппроксимации ВФ при нанесении маски (а). *1* — круговая маска, наносимая на гартманограмму, *2* — ВФ, *3* — результат аппроксимации при отсечении маской точки *X*. График зависимости амплитуды ВФ (ось *Y*) от диаметра круговой маски (ось *X*) — (б). Фазовые карты, измеренные с круговыми масками диаметром 6,92 (в) и 6,5 (г) мм

Fig. 7. (a) Results of wavefront approximation with the use of the image mask. (*1*) Circular mask on the hartmannogram image, (*2*) wavefront, (*3*) result of the surface approximation when the *X* point is excluded measured with circular masks of (в) 6.92 and (г) 6.5 mm diameter by the mask. (б) Wavefront amplitude (*Y*-axis) versus circular mask diameter (*X*-axis). Phase maps for (в) 6,92-mm and (г) 6,5-mm masks

неровности. Но при постепенном уменьшении апертуры те точки, что ранее находились внутри апертуры и «разглаживались», оказываются на краю апертуры. Это приводит к тому, что алгоритм аппроксимации строит в месте расположения этих (этой) граничных точек поверхность таким образом, что она может стремиться резко вверх/вниз (рис. 7а). Вследствие этого возрастает амплитуда отклонений ВФ.

На графике рис. 7б приведена зависимость амплитуды отклонений ВФ от размера круговой маски, ограничивающей область гартманограммы, в которой выполняется расчет ВФ. Видно, что постепенно, начиная с диаметра около 10 мм и до диаметра около 5 мм, амплитуда отклонений ВФ плавно уменьшается, однако уже появляются выбросы (на 7,5, на 6,5 мм). А далее, начиная с диаметра 4 мм и менее, амплитуда отклонений начинает возрастать.

Этот эффект хорошо виден на фазовых картах, представленных на рис. 7в, г. На фазовой карте рис. 7в (диаметр круговой маски составляет 6,92 мм) на профиле по оси *X* слева хорошо виден перегиб. Однако при уменьшении диаметра маски до 6,5 мм (рис. 7г) в результате аппроксимации вместо перегиба профиль уходит резко вверх, что дает дополнительный прирост амплитуды отклонений ВФ.

Впрочем, в большинстве случаев реального использования прибора размер маски (фактически размер области интересов) определяется оператором прибора исходя из того, в какой области детали необходимо измерить отклонения ВФ: должна ли это быть вся поверхность детали, 50% площади и др. На что действительно стоит обращать внимание, так это на граничные фокальные пятна по апертуре: здесь может проявляться так называемый «эффект одной точки», когда исключение/вклю-

чение одной ячейки сетки ОВФ существенно изменяет картину аппроксимированного ВФ. Как правило, такое случается, когда фокальное пятно сильно искажено, но не по причине локальной кривизны поверхности детали, а ввиду неких граничных эффектов (например, это фокальное пятно сформировано излучением, отраженным от самой границы детали). Такие фокальные пятна должны быть исключены из рассмотрения.

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ГАРТМАНОМЕТРА И ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФИЗО

Преимущества и недостатки классического интерферометра Физо и гартманометра представлены в табл. 2.

Особо стоит отметить такие преимущества гартманометра, как слабая чувствительность к вибрациям, возможность измерений ВФ в режиме реального времени, а также обширный настраиваемый функционал программного обеспечения — возможность рассчитывать фазовую поверхность, функцию рассеяния точки, распределение интенсивности пучка, сохранять отчеты об измерениях, экспортировать результаты измерений в файлы данных в режиме реального времени и др. Гартманометр оказывается весьма полезен в случае диагностики качества поверхностей малоапертурных выпуклых линз. Отражение пучка от поверхности выпуклой малой линзы занимает только малую часть апертуры ДШГ и для измерения всей поверхности требуется выполнять сканирование в режиме реального времени. Этот функционал напрямую поддерживается в программном обеспечении гартманометра.

Среди недостатков гартманометра стоит выделить необходимость весьма прецизионной начальной юстировки оптических элементов устройства, а также необходимость наличия высококачественного коллиматора, с помощью которого измеряется эталонный ВФ для ДШГ. Однако апертура коллиматора не должна быть большой и вполне может составлять около 25 мм, поскольку современные промышленные камеры, применяемые при изготовлении ДШГ, как правило, имеют размер матрицы 11×11 мм и меньше.

Несмотря на имеющиеся недостатки, нельзя не отметить, что и ДШГ, и программное обеспечение к нему, и в целом прибор (гартманометр) являются полностью отечественной разработкой. К компонентам, которые требуется закупать, относятся только видеокамеры и микролинзовый растр. Впрочем, на рынке уже присутствуют отечественные компании, производящие и видеокамеры, и массив микролинз. В остальном же — изготовление дополнительных оптомеханических деталей (например, насадки для установки окулярной линзы на датчик), монтаж микролинзового растра на матрицу видеокамеры, финальная сборка, калибровка и тестирование устройства — все это полностью отечественная разработка.

Таблица 2. Сравнение интерферометра Физо и гартманометра
Table 2. Comparison of Fizeau interferometer and Hartmannometer

Параметр	Гартманометр	Интерферометр Физо
Источник излучения	Одномодовый лазер	Высококогерентный лазер
Эталонная поверхность	Требуется 1 раз для записи эталонного ВФ ДШГ	Требуется постоянно
Спектральный диапазон, нм	400–1100	Одна длина волны
Пространственное разрешение (камера с матрицей $^1/_2''$)	При диаметре микролинзы 100 мкм — 3072 элементов	При размере пиксела 4 мкм — 1 920 000 элементов
Погрешность	Амплитуда $\lambda/10$	Амплитуда $\lambda/10$
Динамический диапазон	Сотни микрометров	До 10 мкм
Оптические фильтры	Не требуются	Требуются
Особенности	Практически полная независимость от вибраций	Чувствительность к вибрациям

Что касается корректности полученных результатов, необходимо отметить, что базовый математический аппарат восстановления ВФ является неизменным — измеряются смещения фокальных пятен, рассчитывается матрица производных полиномов Цернике и относительно неизвестного вектора коэффициентов решается переопределенная система линейных уравнений методом наименьших квадратов. Однако функционал программного обеспечения гартманометра может быть легко расширен. Например, уже добавлены различные алгоритмы «отбраковки» пустых кадров (в случае, когда лазерный пучок вдруг оказывается перекрыт полностью или частично), добавлены различные методы решения системы линейных уравнений (в дополнение к методу наименьших квадратов — разложение Холецкого, сингулярное разложение), а также различные методы аппроксимации ВФ (в дополнение к полиномам Цернике — полиномы Зейделя, би-сплайны и пр.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработано и исследовано новое оптомеханического устройство на основе датчика ВФ Шака—Гартмана, названное гартманометром, как альтернатива классическому интерферометру Физо для задач контроля качества оптических поверхностей. Представлен метод калибровки гартманометра, а также приведено сравнение результатов измерения тестовой оптической поверхности апертурой 35 мм с помощью разработанного устройства и с помощью классического интерферометра Физо. Общая амплитуда искажений ВФ, измеренная с помощью интерферометра Физо, составила 0,127 мкм (СКО = 0,022 мкм). Гартманометр показал амплитуды искажений 0,131 мкм (СКО = 0,024 мкм). В перспективе разработанное устройство может служить более надежной и бюджетной альтернативой интерферометру Физо в задачах контроля плоскостности оптических поверхностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hariharan P., Sen D. The double-passed Fizeau interferometer // JOSA. 1960. V. 50. P. 999–1001. https://doi.org/10.1364/JOSA.50.000999

Lyon R., Carpenter K., Huet H., et.al. Building the Fizeau interferometer testbed // IEEE Aerospace Conf. Proc. 2004. Big Sky, USA. March 6–13, 2004. P. 2201–2210. https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1368013

2. Smythe R. Practical aspects of modern interferometry for optical manufacturing quality control: Part 2 // Adv. Opt. Techn. 2012. V. 1. P. 203–212. https://doi.org/10.1515/aot-2012-0026

Самаркин В.В., Александров А.Г., Галактионов И.В. и др. Широкоапертурная адаптивная оптическая система для коррекции искажений волнового фронта излучения петаваттного Ti:сапфирового лазера // Квант. электрон. 2022. Т. 52. № 2. С. 187–194. https://doi.org/10.1070/QEL17989

Samarkin V., Alexandrov A., Galaktionov I., et al. Large-aperture adaptive optical system for correcting wavefront distortions of a petawatt Ti:sapphire laser beam // Quant. Electron. 2022. V. 52. № 2. P. 187–194. https://doi.org/10.1070/QEL17989

3. Yagnyatinskiy D.A., Fedoseyev V.N. Modal control of a deformable mirror via the focal spot using actuator influence functions // Internat. Conf. Laser Optics 2018. St. Petersburg, Russia. June 4–8, 2018. P. 8435877. https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435877
4. Platt B., Shack R.J. History and principles of Shack–Hartmann wavefront sensing // Refr. Surg. 2001. V. 17. № 15. P. 2. https://doi.org/10.3928/1081-597X-20010901-13
5. Liang J., Grimm B., Goelz S., et al. Objective measurement of the wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann–Shack wave-front sensor // JOSA. A. 1994. V. 11. P. 1949. https://doi.org/10.1364/josaa.11.001949
6. Lane R.G. Wave-front reconstruction using a Shack–Hartmann sensor // Appl. Opt. 1992. V. 31. P. 6902. https://doi.org/10.1364/AO.31.006902
7. Primot J. Theoretical description of Shack–Hartmann wave-front sensor // Opt. Commun. 2003. V. 222. P. 81–92. https://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01565-7
8. Konnik M., Doná J. Waffle mode mitigation in adaptive optics systems: A constrained receding horizon control approach // American Control Conf. Washington, DC, USA. June 17–19, 2013. P. 3390–3396. https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580355
9. Mauch S., Reger J. Real-time spot detection and ordering for a Shack–Hartmann wavefront sensor with a low-cost FPGA // IEEE Trans. Instrum. Meas. Montevideo, Uruguay. June 12–15, 2014. V. 63. P. 2379–2386. https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2310616
10. Dai Y., Li F., Cheng X., et. al. Analysis on Shack–Hartmann wave-front sensor with Fourier optics // Opt. & Laser Technol. 2007. V. 39. № 7. P. 1374–1379. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2006.10.014
11. Tallon M., Thiebaut E., Langlois M., et.al. The wavefront sensing making-of for THEMIS solar telescope // Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes. 2021. V. 6. P. 1–7. https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.02892
12. Zhou P., Burge J. Limits for interferometer calibration using the random ball test // SPIE. San Francisco, USA. January 25–31, 2009. V. 7426. P. 74260U. https://doi.org/10.1117/12.828503
13. Galaktionov I., Sheldakova J., Nikitin A., et al. A hybrid model for analysis of laser beam distortions using Monte Carlo and Shack–Hartmann techniques: Numerical study and experimental results // Algorithms. 2023. V. 16. № 7. P. 337. https://doi.org/10.3390/a16070337
14. Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., et al. B-spline approximation of a wavefront measured by

Shack–Hartmann sensor // SPIE. San Diego, USA. August 1–5, 2021. V. 11818. P. 118180N. https://doi.org/10.1117/12.2598249
15. Malacara-Hernandez D. Wavefront fitting with discrete orthogonal polynomials in a unit radius circle // Opt. Eng. 1990. V. 29. № 6. P. 672–675.
16. Wyant J.C., Creath K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology / Proc. Appl. Opt. and Opt. Eng.: Academic Press, Inc., 1992. P. 27–39.
17. Li J., Li W., Huang R. An efficient method for solving a matrix least squares problem over a matrix inequality constraint // Computational Optimization and Applications. 2016. V. 63. № 2. P. 393–423. https://doi.org/10.1007/s10589-015-9783-z
18. Рукосуев А.Л. Коррекция фазовых искажений излучения тераваттных фемтосекундных лазеров методами адаптивной оптики // Дисс. канд. физ.-мат. наук. М.: Московский государственный открытый университет, 2006. 153 с.
Rukosuev A.L. Correction of phase distortions of laser terawatt femtosecond radiation by means of adaptive optics [in Russian] // PhD (Physics and Mathematics) Thesis. Moscow: Moscow Open State University, 2006. 153 p.
19. Nikitin A., Galaktionov I., Sheldakova J., et al. Absolute calibration of a Shack–Hartmann wavefront sensor for measurements of wavefronts // SPIE Photonics West. San Francisco, USA. February 3–7, 2019. V. 10925. P. 109250K. https://doi.org/10.1117/12.2510047

АВТОРЫ

Илья Владимирович Галактионов — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, Москва, 119334, Россия; Scopus ID: 56352323900; https://orcid.org/0000-0002-8993-3741; galaktionov@activeoptics.ru

Александр Николаевич Никитин — научный сотрудник, Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, Москва, 119334, Россия; Scopus ID: 56647558000; https://orcid.org/0000-0002-6636-905X; nikitin@activeotpics.ru

Юлия Вячеславовна Шелдакова — старший научный сотрудник, Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, Москва, 119334, Россия; Scopus ID: 57327314600; https://orcid.org/0000-0002-5160-1194; sheldakova@nightn.ru

Владимир Владимирович Топоровский — младший научный сотрудник, Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, Москва, 119334, Россия; Scopus ID: 57202457583; https://orcid.org/0000-0002-8172-5171; topor@activeoptics.ru

Саусан Хассановна Абдулразак — младший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия; https://orcid.org/0009-0003-7605-9295; Sausana95@mail.ru

Алексей Валерьевич Кудряшов — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, Москва, 119334, Россия; профессор Московского политехнического университета, Москва, 107023, Россия; Scopus ID: 7004918935; https://orcid.org/0000-0002-7856-2834; kud@activeoptics.ru

Статья поступила в редакцию 11.11.2023
Одобрена после рецензирования 05.04.2024
Принята к печати 30.09.2024

AUTHORS

Ilya V. Galaktionov — PhD (Physics and Mathematics), Researcher, Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics RAS, Moscow, 119334, Russia; Scopus ID: 56352323900; https://orcid.org/0000-0002-8993-3741; galaktionov@activeoptics.ru

Alexander N. Nikitin — Researcher, Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics RAS, Moscow, 119334, Russia; Scopus ID: 56647558000; https://orcid.org/0000-0002-6636-905X; nikitin@activeotpics.ru

Julia V. Sheldakova — Senior Researcher, Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics RAS, Moscow, 119334, Russia; Scopus ID: 57327314600; https://orcid.org/0000-0002-5160-1194; sheldakova@nightn.ru

Vladimir V. Toporovsky — Junior Researcher, Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics RAS, Moscow, 119334, Russia; Scopus ID: 57202457583; https://orcid.org/0000-0002-8172-5171; topor @activeotpics.ru

Sausan H. Abdulrazak — Junior Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; https://orcid.org/0009-0003-7605-9295; Sausana95@mail.ru

Alexis V. Kudryashov — Dr. Sci (Physics and Mathematics), Full Professor, Head of Laboratory, Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics RAS, Moscow, 119334, Russia; professor, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russia; Scopus ID: 7004918935; https://orcid.org/0000-0002-7856-2834; kud@activeotpics.ru

The article was submitted to the editorial office 11.11.2023
Approved after review 05.04.2024
Accepted for publication 30.09.2024