
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.317.2
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-2-143-149

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЦИФРОВЫМ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

М. Е. ЗАЦЕПИНА, В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: marichka_za@list.ru*

Предложен цифровой (количественный) метод контроля волновых aberrаций оптических систем на основе изофотометрии. Метод предполагает трансформацию пары теневых картин в геометрические модели тенеграм линейной решетки при использовании функций преобразования (включая функцию „клин“) и их дальнейшую обработку с помощью специально разработанного программного обеспечения. Выполнены оценки качества исследуемой оптической системы, в том числе построена карта деформаций волнового фронта, вычислены характеристики качества изображения системы.

Ключевые слова: геометрическая модель тенеграммы линейной решетки, деформации волнового фронта, изофотометрия, нож Фуко, теневой метод

Введение. Теневой метод ножа Фуко, разработанный в 1856 г. и повсеместно применяемый в наши дни в оптическом производстве, обеспечивает визуализацию функции искажений волнового фронта как полутоновой картины, позволяющей лишь качественно отображать деформации исследуемой оптической поверхности. Метод количественной расшифровки теневых картин в существующих модификациях сложен и трудоемок и соответственно не нашел широкого практического применения [1].

В настоящей статье описывается разработанный цифровой (количественный) теневой метод на основе технологии изофотометрии [2, 3], позволяющий получать цифровую карту волновых aberrаций и ошибок оптической поверхности с точностью до сотых долей длины волны [4], а также рассчитывать характеристики качества изображения исследуемой оптической системы.

Как известно, посредством теневого метода ножа Фуко поверхность деформаций волнового фронта визуализируется как полутоновая картина, отображая первую производную деформаций волнового фронта в тенеграмме в форме функции распределения освещенности [5]. Полученная тенеграмма дает возможность визуально оценивать характер aberrаций исследуемой оптической системы или структуру ошибок обработки исследуемой оптической поверхности.

Основные достоинства традиционного (качественного) теневого метода [6]: 1) высокая чувствительность обнаружения ошибок на исследуемой волновой поверхности — $0,1\lambda$ и менее; 2) наглядность отображения структуры ошибок обработки поверхности, что повышает производительность процесса обработки и его качество; 3) низкая чувствительность метода к вибрациям; 4) простота и высокая экономичность схемной и аппаратной реализации.

Недостаток метода — невозможность восстановления цифровой карты деформаций волнового фронта контролируемой системы.

Для реализации цифрового теневого метода разработан аппаратно-программный комплекс „GEPARD“ (рис. 1), включающий в себя специализированную теневую установку и компьютер со специальным программным обеспечением.

Принципиальная схема комплекса включает: 1 — лампа с прямоугольной спиралью; 2 — конденсор; 3 — интерференционный монохроматический светофильтр, 4 — специальный тест-объект типа „полубесконечная щель“; 5 — объектив коллиматора; 6 — исследуемая оптическая система (объектив) в поворотном держателе; 7 — выходной зрачок исследуемого объектива; 8 — нож Фуко, пересекающий изображение тест-объекта; 9 — объектив регистрирующей матричной фотокамеры; 10 — корпус камеры; 11 — матричный приемник изображения; 12 — компьютер.

В качестве предмета исследования был выбран фотообъектив „Гелиос-44“ 6 с заводским номером 79604 52.

Матричная фотокамера передает оптическое изображение теневой картины ножа Фуко в компьютер, оснащенный программой МБВК (многоуровневый блок выделения контура в изображении) для формирования системы изофот и комплексом программного обеспечения „Tiger“, необходимого для восстановления волнового фронта исследуемой оптической системы 6 и характеристик качества изображения, которое она формирует.

Для данной схемы контроля количественным цифровым теневым методом характерны следующие отличительные особенности.

— Тест-объект — „полубесконечная щель“ по Филберу [6] реализуется в виде спектральной щели, перекрытой перпендикулярно наложенной заслонкой, пересекающей оптическую ось. Такой тест-объект обеспечивает пропорциональность освещенности в данном участке тенеграммы уровню поперечных аберраций, соответствующих функции деформаций исследуемого волнового фронта. Щель располагается перпендикулярно лезвию ножа.

— Установленный источник работает в монохроматическом излучении. В качестве источника света установки используется осветитель ОИ-19 с коллектором и лампой СЦ1Р; на входном тубусе спектральной щели установлен интерференционный монохроматический светофильтр на длину волны 0,633 мкм. Для калибровки результатов, даваемых разработанным цифровым теневым методом, параллельно выполняется контроль того же объектива на интерферометре Физо (источник излучения — гелий-неоновый лазер с длиной волны 0,633 мкм).

— Узел держателя объектива создает возможность поворота объектива на оптической оси на 90° без смещения с оси для получения пары теневых картин в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Тест-объект и нож при этом неподвижны.

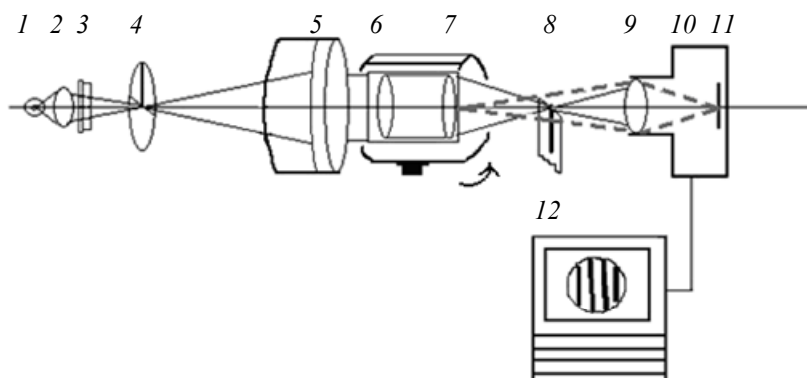


Рис. 1

Согласно разработанному методу контроля аберраций и оценки деформаций волнового фронта, две теневые картины (тенеграммы) регистрируются при расположении рассматри-

ваемого объектива в двух взаимно перпендикулярных положениях на оптической оси (что соответствует одновременному повороту лезвия ножа Фуко и тест-объекта). Далее каждое теневое изображение преобразуется с применением наложенного фотометрического клина с помощью компьютерной программы оконтуривания в карту тенеграммы, представляющую собой систему контуров — изофотограмму, которая играет роль геометрической модели тенеграммы линейной решетки.

На рис. 2 представлена исследуемая сферическая оптическая поверхность, имеющая в центральной части отклонение от сферической формы, на которой условно выделены три участка (верхний FG , средний DF и нижний GH), а на рис. 3 представлена модель сформированной теневой картины.

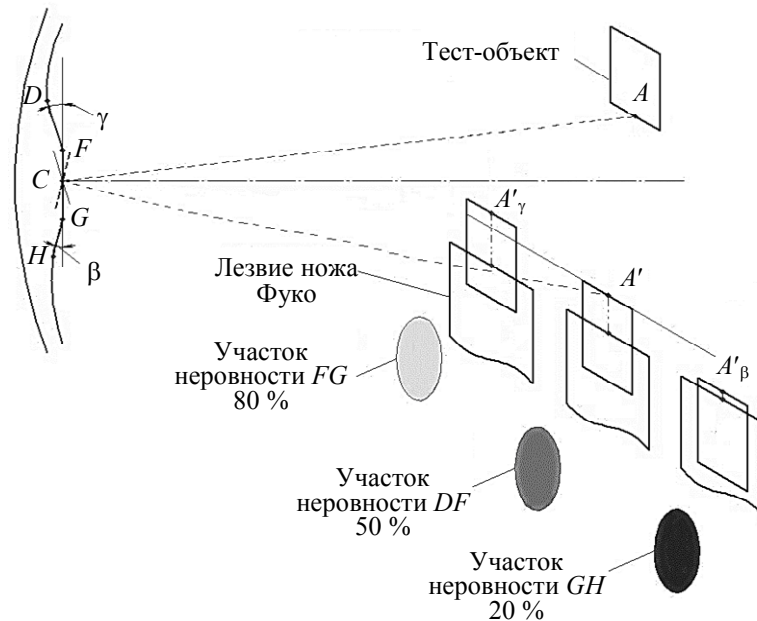


Рис. 2

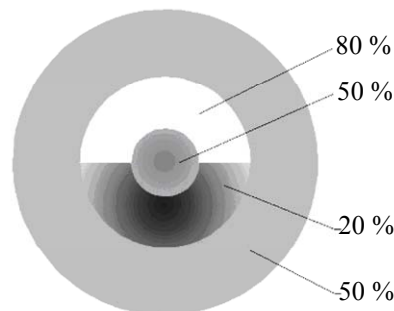


Рис. 3

Если пучок лучей упал на лезвие ножа Фуко от участка поверхности без заклона (FG), то нож пересекает изображение тест-объекта пополам. При этом непокрытое изображение тест-объекта пропускает 50 % света от данного отраженного участка.

Лучи, отраженные от участка GH , имеющего положительный заклон на угол β , строят изображение тест-объекта таким образом, что изображение A'_β смещается относительно ножа Фуко вниз в направлении большего перекрытия тест-объекта. Вследствие этого непокрытое изображение тест-объекта пропускает порядка 20 % света от отражающего участка исследуемой поверхности.

Лучи, отраженные от участка FD , имеют заклон к идеальной поверхности на угол γ , создающий отрицательную aberrацию, при этом изображение A'_γ имеет смещение относительно

ножа Фуко вверх в направлении меньшего перекрытия тест-объекта. Здесь непокрытое изображение тест-объекта пропускает 80 % света от отраженного участка исследуемой поверхности. Отображение на тенеграмме этого участка будет более светлым и будет иметь наибольшую освещенность.

Рассмотрим алгоритм компьютерной обработки полутоновых теневых картин, используемый для реализации цифрового теневого метода.

Алгоритм включает в себя следующие этапы:

1) пространственная фильтрация полученных теневых картин фотообъектива в программе Adobe Photoshop с целью устранения высокочастотных шумов тенеграммы;

2) введение амплитудного (фотометрического) клина для настройки изофотограммы теневой картины на режим прямолинейных полос — по аналогии с классическим интерференционным методом, когда прямолинейные полосы получаются введением фазового клина при взаимном заклоне образцового и контролируемого (рабочего) волновых фронтов;

3) преобразование тенеграммы в системы изолиний (изофот) теневой картины ножа Фуко в программе МБВК в качестве геометрической модели тенеграммы линейной решетки;

4) компьютерная обработка пары геометрических моделей тенеграмм линейной решетки (полученных с поворотом ножа Фуко на 90° для второй тенеграммы) в программе „Tiger“ [7] с целью восстановления цифровой карты функции деформации волнового фронта исследуемой системы [8];

5) расчет необходимых характеристик качества изображения исследуемой поверхности или системы, таких как функция рассеяния точки (ФРТ) и частотно-контрастная характеристика (ЧКХ).

На рис. 4, *а* представлена теневая картина объектива „Гелиос-44“ после фильтрации и применения линейного фотометрического клина, на рис. 4, *б* — система изофот теневой картины как геометрическая модель тенеграммы линейной решетки.

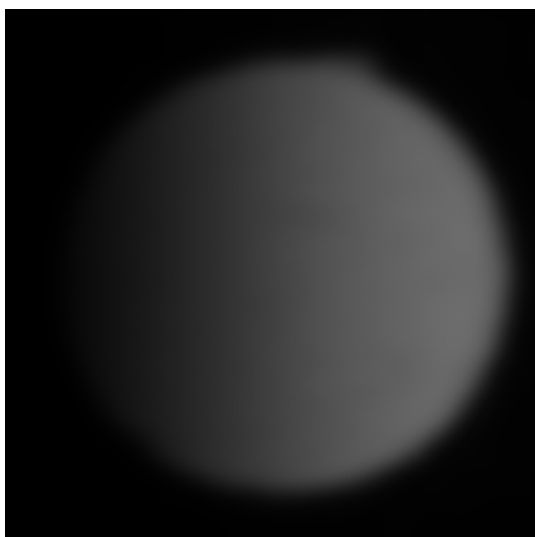
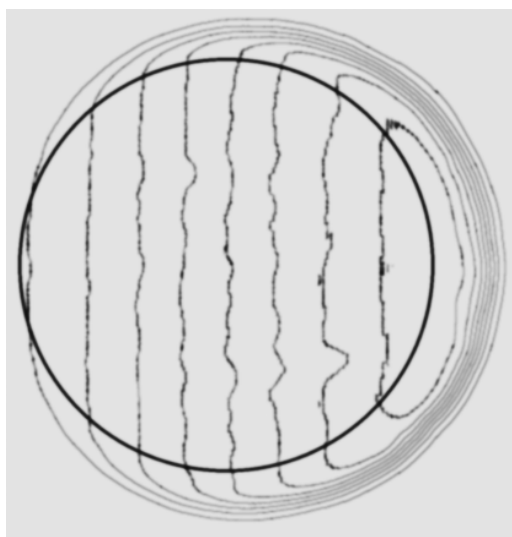
а)*б)*

Рис. 4

Результаты компьютерной обработки содержат карту деформаций волнового фронта (рис. 5, *а*), профили деформаций волнового фронта по направлениям X и Y , графики ЧКХ, а также ФРТ.

После калибровки результатов, полученных с помощью предложенного метода, была построена карта деформаций волнового фронта объектива (рис. 5, *б*) на интерферометре Физо.

Обращение фазы деформаций волнового фронта на интерферограмме Физо связано с зеркальным отражением в автоколлимационной схеме контроля объектива на интерферометре [2].

По той же причине величина волновых aberrаций, полученная на интерферометре Физо, делится на два (двойное прохождение волнового фронта при автоколлимационном контроле объектива). В итоге калибровки наблюдается хорошая сходимость результатов измерения волновых aberrаций при контроле количественным теньвым методом (среднеквадратическое отклонение волнового фронта $RMS = 0,593 \lambda$) и интерферометрическим методом ($RMS = 0,568 \lambda$).

На рис. 6 представлены интерференционные картины исследуемого объектива: *a* — интерферограмма объектива, полученная цифровым теньвым методом, *б* — с помощью интерферометра Физо.

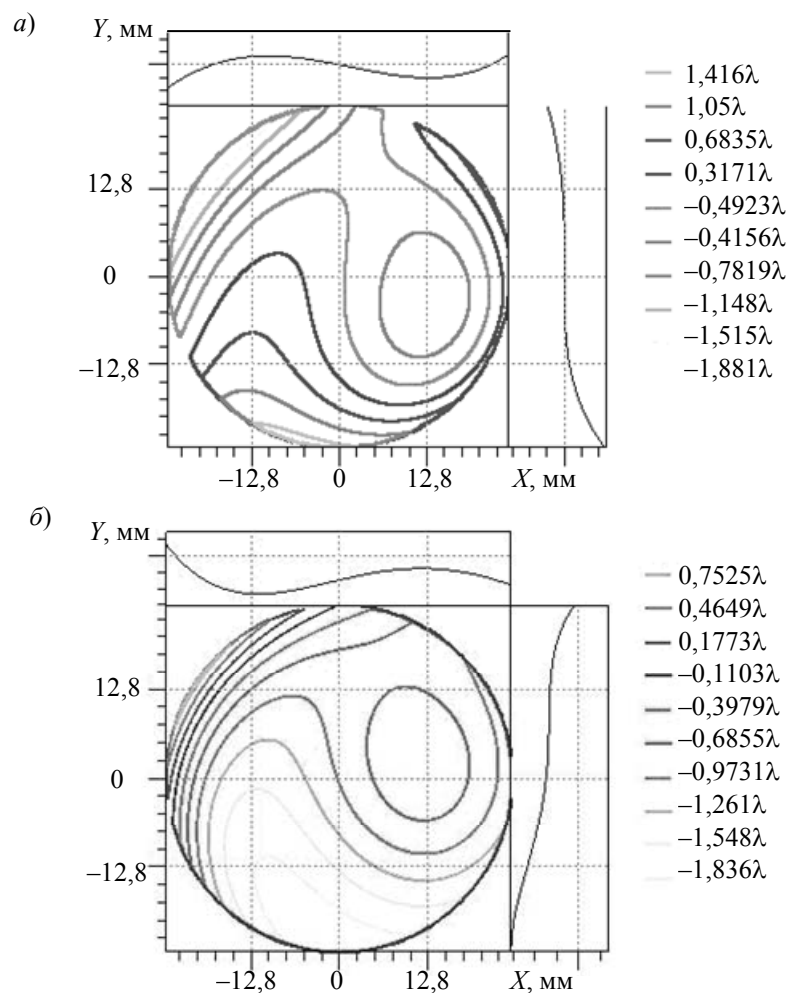


Рис. 5

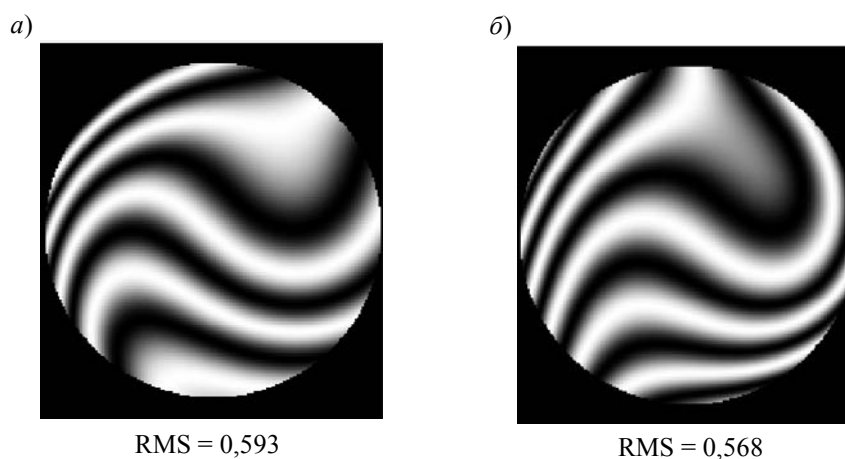


Рис. 6

Главными достоинствами предложенного метода являются возможность определения функции волновых aberrаций оптической системы и комплекса цифровых характеристик качества изображения, а также простота и невысокая стоимость практической реализации метода и аппаратуры. Кроме того, метод отличается пониженной чувствительностью к вибрациям, что очень важно в условиях действующего производства. Он не требует применения образцовых оптических поверхностей, которые в интерферометрии являются главным источником погрешностей.

Метод обеспечивает возможность контроля объективов в штатном режиме работы в проходящем свете (что позволяет, например, контролировать деформации волнового фронта космического телескопа непосредственно в процессе проводимых наблюдений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Тенеграмма линейной решетки как геометрическая модель интерферограммы сдвига // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 5. С. 66—69.
2. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения. СПб: Лань, 2010. 304 с.
3. Зверев В. А., Кирилловский В. К., Сокольский М. Н. Применение метода изофотометрической фоторегистрации при исследованиях и аттестации главного зеркала БТА // ОМП. 1976. № 12. С. 6—8.
4. Максutow Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. М.: Наука, 1984. 272 с.
5. Витриченко Э. А. Методы исследования астрономической оптики. М.: Наука, 1980. 152 с.
6. Зацепина М. Е. Разработка и исследование количественного теневого метода, основанного на применении средств компьютерной изофотометрии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2014. 18 с.
7. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Ч. 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 131 с.
8. Зацепина М. Е. Разработка и исследование количественного теневого метода, основанного на применении средств компьютерной изофотометрии // Сб. работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга. СПб: Университет ИТМО, 2014. С. 75—82.

Сведения об авторах

Марина Евгеньевна Зацепина

— аспирант; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: marichka_z@list.ru

Владимир Константинович Кирилловский

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: vkkir@mail.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
07.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Измерение волновых aberrаций оптических систем цифровым теньевым методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 2. С. 143—149.

MEASURING THE WAVE ABERRATION IN OPTICAL SYSTEMS BY THE DIGITAL SHADOW METHOD

M. E. Zatsepina, V. K. Kirillovsky

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: marichka_z@list.ru

A digital method for quantitative control of wave aberrations in optical systems is proposed. The approach is based on the method of izophotometry and involves transformation of a pair of shadow images into geometric models of shadowgrams of a linear grating using transformation function (including the "wedge" function), and the further processing of the models with specially designed software. The analyzed optical system quality is assessed; wavefront deformation map and characteristics of the system image quality are presented.

Keywords: geometric model of a linear grating shadowgram, wavefront deformations, izophotometry, Foucault knife-edge, shadow method

Data on authors

- Marina E. Zatsepina** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: marichka_z@list.ru
- Vladimir K. Kirillovsky** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: vkkir@mail.ru

For citation: *Zatsepina M. E., Kirillovsky V. K.* Measuring the wave aberration in optical systems by the digital shadow method // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 2. P. 143—149 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-2-143-149