
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.317.2
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-382-387

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОГО ТЕНЕВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТИВА „ГЕЛИОС-44“

М. Е. ЗАЦЕПИНА, В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ

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

Представлены три способа формирования и использования фотометрического клина при реализации цифрового (количественного) изофотометрического теневого метода. Указанные способы позволяют на основе обработки пары теневых картин с помощью специально созданного программного обеспечения построить карту деформаций волнового фронта и определить характеристики качества изображения, формируемого исследуемой оптической системой.

Ключевые слова: *теневой метод, изофотометрия, структура изображения, нож Фуко, фотометрический клин, карта деформаций волнового фронта*

Введение. В работах [1—3] представлено подробное описание разработанного количественного изофотометрического теневого метода контроля, позволяющего исследовать волновые aberrации, оценить качество изображения, формируемого оптическими элементами, включая фотографические объективы, а также рассчитать характеристики качества оптического изображения в виде функций.

Основными достоинствами предложенного количественного теневого метода являются: точность на уровне $1/50 \lambda$ и более, что превышает чувствительность теневой картины ножа Фуко, малая чувствительность к вибрациям, простота и наглядность интерпретации характера и уровня aberrаций системы либо величины и локализации ошибок формы контролируемой оптической поверхности.

Актуальность представленного метода заключается в том, что он является *количественным*; метод основан на компьютерной трансформации теневого изображения в контурную карту, позволяющую получать цифровой массив, отображающий ошибки поверхностей и aberrации систем; дальнейшая обработка массива приводит к *определению функции деформаций волнового фронта* и связанных с ней цифровых характеристик качества изображения, формируемого исследуемой системой.

Реализация метода. Схема исследовательской установки для реализации предложенного количественного теневого метода представлена на рис. 1, где 1 — лампа с прямоугольной спиралью; 2 — конденсор; 3 — интерференционный монохроматический светофильтр ($\lambda=0,6328$ мкм), 4 — фокальный узел коллиматора, включающий тест-объект „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 матричной камеры; 11 — матричный приемник изображения; 12 — компьютер в режиме обработки тенеграмм.

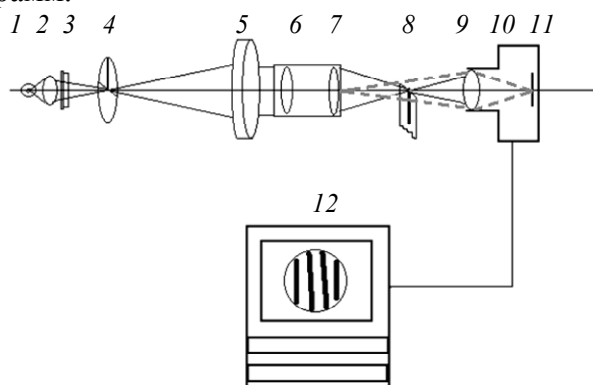


Рис. 1

Сущность разработанного метода заключается в обработке двух тенеграмм одного объекта; одна из тенеграмм регистрируется при повороте ножа Фуко на 90° . Оригинальность схемного решения установки состоит в том, что предложен и реализован способ поворота исследуемой системы на 90° в точном поворотном устройстве для получения второй регистрируемой тенеграммы; при этом, в отличие от ранее предложенных прототипов (например, Филбера), исключается необходимость поворота тест-объекта „полубесконечная щель“ и поворота ножа Фуко, и соответственно становится ненужным устройство для осуществления этих поворотов, что существенно повышает простоту установки и экономичность ее реализации.

Основным отличительным элементом предложенной оригинальной схемы контроля является тест-объект „полубесконечная щель“ по Филберу [1], который обеспечивает пропорциональность освещенности в тенеграмме уровню поперечной aberrации исследуемого волнового фронта по нормали к положению лезвия ножа Фуко. Блок тест-объекта типа „полубесконечная щель“ выполнен на базе узла спектральной щели, перекрытой перпендикулярно наложенной заслонкой, пересекающей оптическую ось. Использование тест-объекта вместо обычной светящейся точки также создает условия для увеличения яркости теневой картины.

Схема формирования теневой картины при точном совпадении положения ножа Фуко с плоскостью фокусировки, в которой создано изображение тест-объекта, подробно описана в работе [4].

Разработанный метод калибровки предусматривает сопоставление результатов контроля оптической системы с помощью созданного количественного теневого метода и результатов интерферометрического контроля этой же оптической системы на аттестованном заводском двухлучевом интерферометре, содержащем образцовый волновой фронт (например, по схеме Физо).

Таким образом, при разработке количественного теневого метода были получены представленные в настоящей статье новые технические результаты:

- трансформация плавной функции распределения освещенности в полутоновом изображении тенеграммы в контурную карту как систему изофот теневой картины;
- формирование геометрической модели тенеграммы линейной решетки в виде системы изофот при наложении на полутоновое изображение тенеграммы фотометрического клина;
- регистрация, обработка, расшифровка и анализ пары теневых картин как геометрических моделей тенеграмм линейной решетки.

Варианты формирования фотометрического клина интенсивности. Для получения контурной карты, состоящей из параллельных полос, т.е. для построения геометрической модели тенеграммы линейной решетки, применяется наложение на теневую картину линейного

фотометрического клина. Формирование фотометрического клина, как показало исследование этого процесса, может осуществляться тремя различными способами.

Первый способ. Исследование фотометрической структуры изображения с применением фотометрического клина с линейным законом изменения оптической плотности материала проводилось по предложенному проф. В. А. Зверевым и проф. В. К. Кирилловским методу исследования функции рассеяния линии в расширенном динамическом диапазоне перепада освещенности до 10^4 [5, 6]. Применение данного метода описано в работе [7].

Использовался фотометрический клин (как оптический узел), склеенный из двух призм, изготовленных из нейтрально-серого стекла HC10 и бесцветного стекла К8 (рис. 2). Клин функционирует как плоскопараллельная пластинка, так как показатель преломления двух стекол одинаков. На рис. 3, а приведена схема функционирования фотометрического клина 1, наложенного на оптическое изображение, сформированное совокупностью пучков лучей на чувствительной площадке матричного приемника изображения 2. Распределение освещенности, создаваемое на чувствительной площадке, показано на рис. 3, б.

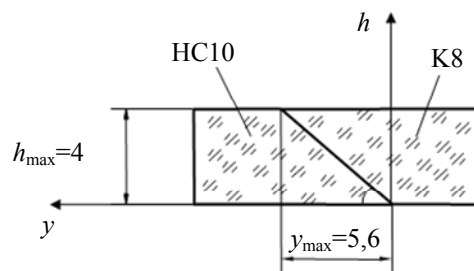


Рис. 2

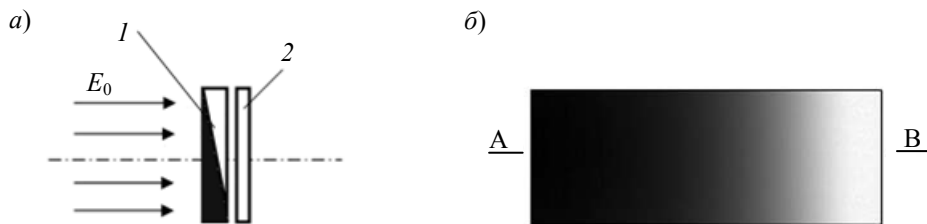


Рис. 3

Второй способ. Формирование клина осуществляется компьютерным методом с помощью опции „градиент“ в программе Adobe Photoshop, которая при реализации этой опции создает на экране монитора логарифмическую функцию распределения освещенности.

Изображение, создаваемое компьютерным фотометрическим клином, по своим фотометрическим характеристикам соответствует, как показали исследования, изображению, формируемому стеклянным фотометрическим клином.

Вариант применения клина рассмотрен в работе [3], где приведены результаты исследования фотообъектива „Гелиос-44“ разработанным количественным теневым методом с использованием компьютерного наложения линейного фотометрического клина в программе Adobe Photoshop и последующим использованием функции преобразования [6] типа „гребенка“ в программе „Многоуровневый блок выделения контура в изображении (МБВК)“.

Третий способ формирования клина, разработанный по предложению проф. В. А. Зверева, — это метод создания клина, который оптически формируется в плоскости теневой картины идеального волнового фронта при малых расфокусировках ножа Фуко. Данный способ позволяет получить освещенность в форме линейного клина, наложенного на изображение равномерно освещенного зрачка исследуемой оптической системы (для случая формирования теневой картины поверхности, не имеющей ошибок).

Рассматриваемая схема формирования клиновидного распределения освещенности показана на рис. 4. В данном случае нож Фуко располагается в плоскости, смещенной от плос-

кости тест-объекта, на расстояние $\Delta f'$. Изображение, формируемое участком волнового фронта на верхнем краю зрачка оптической системы, дает изображение тест-объекта, смещенное на 100 % его высоты относительно края ножа Фуко. Проходящий далее пучок лучей создает в плоскости теневой картины 100 %-ный уровень освещенности, так как изображение тест-объекта, совмещенное с ножом Фуко, не было перекрыто.

Изображения, формируемые участками волнового фронта, находящимися на последующих различных (разделенных равными промежутками) расстояниях вдоль его диаметра, позволяют создать ряд изображений тест-объекта, перекрытых на разную высоту ножом Фуко и в сумме дающих в плоскости теневой картины клиновидное распределение освещенности.

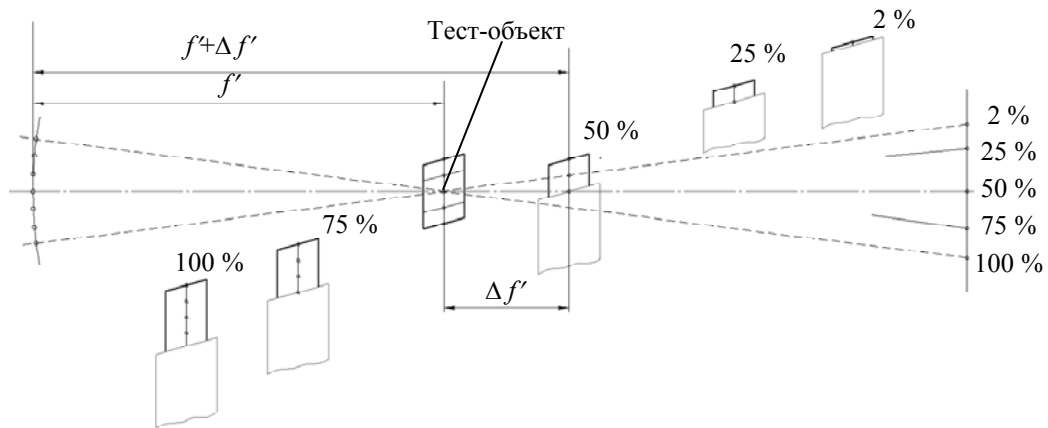


Рис. 4

Экспериментально установлено, что все три способа формирования клина равнозначны и позволяют получить необходимое распределение освещенности, требуемое для построения системы прямолинейных полос, имеющих искривления при наличии деформаций волнового фронта в зрачке оптической системы. Получаемые картины как геометрические модели теневграммы линейной решетки пригодны для ввода в программу обработки интерферограмм (например, Tiger, Zebra MathOptics).

Результаты обработки теневых картин, сформированных фотообъективом „Гелиос-44“ (заводской номер 89110044), при контроле количественным теньевым методом приведены на рис. 5: а — при компьютерном наложении клина, RMS=0,858; б — при расфокусированном ноже Фуко, RMS=0,866.

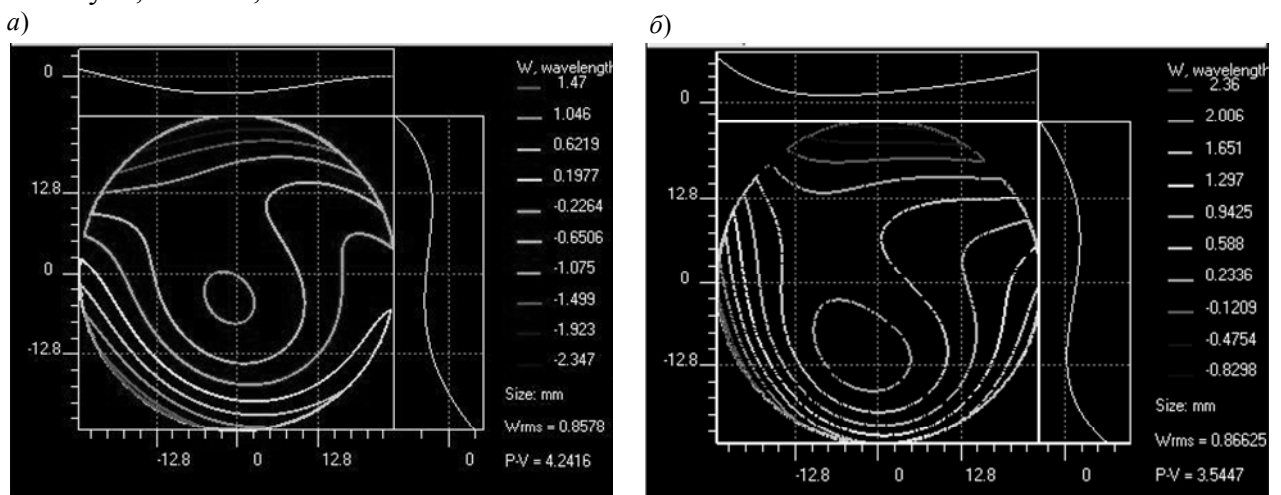


Рис. 5

На рис. 6 приведены результаты калибровочного эксперимента, при котором деформации волнового фронта, сформированного объективом „Гелиос-44“, получены методом интерферометрии с применением аттестованного цифрового интерферометра по схеме Физо.

Объектив установлен в автоколлимации от плоского зеркала, причем интерференционная картина формируется при двойном прохождении лучей через объектив, при этом $RMS = 1,747/2 = 0,873$.

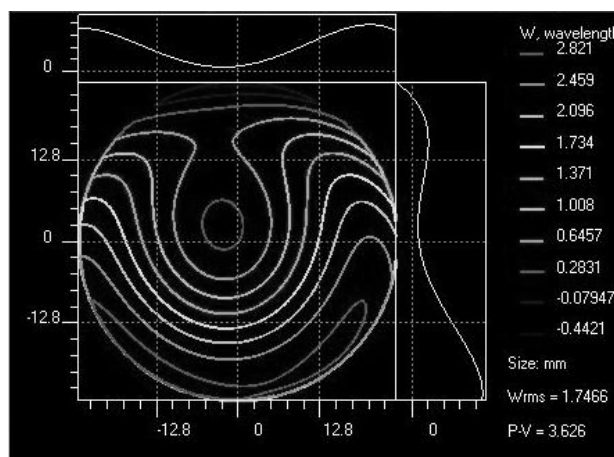


Рис. 6

Заключение. Предложенный компьютеризированный количественный теневой метод ножа Фуко отличается оригинальностью и открывает существенно новые возможности для оптических исследований, выполняемых сегодня традиционными теневыми методами.

Представлены результаты серии экспериментов, в которых геометрические модели тенеграм линейной решетки получены с применением клина, реализованного как методом расфокусировки ножа Фуко, так и методом программной генерации необходимого клина и его наложения на систему изофот исследуемой тенеграммы. В обоих случаях применения клина достигается безошибочная обработка геометрических моделей тенеграм линейной решетки, получаемых в программе „Tiger“. Это подтверждается результатами калибровочного эксперимента с параллельным определением карты волновых aberrаций для данного ряда оптических систем (фотографические объективы) с помощью разработанного количественного теневого метода, с одной стороны, и интерферометрического исследования (по схеме Физо) — с другой. В результате исследований получены цифровые карты деформаций волнового фронта, в которых расхождения между цифровыми значениями деформаций для одной и той же оптической системы не превышают $(0,02 \dots 0,06) \lambda$.

Кроме того, цифровые карты деформаций волнового фронта достоверно отображают, например, ошибки формы изготавливаемой оптической поверхности и могут способствовать созданию технологического процесса ручной или автоматизированной обработки поверхностей с целью приведения их ошибок к минимально достижимым значениям.

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. 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: Ун-т ИТМО, 2014. С. 75—82.
3. Зацепина М. Е. Разработка и исследование количественного теневого метода, основанного на применении средств компьютерной изофотометрии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2014. 18 с.
4. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Измерение волновых aberrаций оптических систем цифровым теневым методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 2. С. 143—149.
5. 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.

6. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения: Учеб. пособие. СПб: Лань, 2010. 304 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.

Сведения об авторах**Марина Евгеньевна Зацепина**

— аспирант; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: marichka_za@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 оптикиПоступила в редакцию
12.10.15 г.

Ссылка для цитирования: Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Варианты реализации цифрового теневого метода контроля волновых aberrаций на примере исследования объектива „Гелиос-44“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 382—387.

**IMPLEMENTATION OPTIONS
FOR DIGITAL SHADOW METHOD OF CONTROL OVER WAVE ABERRATIONS
ON THE EXAMPLE OF HELIOS-44 LENS TESTING****M. E. Zatsepina, V. K. Kirillovsky***ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: marichka_za@list.ru*

Three options of photometric wedge formation and employment in digital photometric shadow method are described. The methods allow for building the wave front deformation map and evaluation of image quality characteristics for the optical system under investigation from a pair of digital patterns processed with the use of specially designed software.

Keywords: shadow method, izofotometry, image structure, Foucault knife-edge, photometric wedge, wave front deformation map

Data on authors**Marina E. Zatsepina**

— Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: marichka_za@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. Implementation options for digital shadow method of control over wave aberrations on the example of Helios-44 lens testing // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 5. P. 382—387 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-382-387