



УДК 535.317.2

М. Е. Зацепина, В. К. Кирилловский  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики

## Разработка современного количественного теневого метода оценки параметров качества оптической системы

*Описан алгоритм исследования качества изображения, даваемого оптической системой, разработанным современным количественным теневым методом. Метод позволяет выполнять количественную оценку ряда параметров качества исследуемой оптической системы. Представлены принцип, схема и конструкция установки для реализации данного метода, а также теоретические основы и методика его реализации.*

### Теневой метод, нож Фуко, геометрическая модель интерферограммы поперечного сдвига, изофотометрия, деформации волнового фронта

Целью проведения данного исследования является количественная оценка aberrаций оптической системы (или ошибок оптической поверхности) посредством использования теневой картины ножа Фуко, подвергнутой компьютерной трансформации и обработке. Трансформация тенеграммы реализуется на основе использования изофотометрии, что позволяет получить контурную карту деформаций исследуемого волнового фронта, обеспечивает преобразование полутоновой теневой картины ножа Фуко в картину геометрической модели тенеграммы линейной решетки. Полученная в результате трансформации система полос может быть введена для расшифровки в программу обработки картины интерференционных полос, в частности – расшифровки интерферограммы сдвига. В результате обработки исследователь получает карту деформаций волнового фронта исследуемой системы, таблицу коэффициентов Цернике, характеризующих поверхность волновых aberrаций системы, а также характеристики качества изображения, даваемого исследуемой оптической системой, такие как функция рассеяния точки (ФРТ), функция рассеяния линии (ФРЛ) и частотно-контрастная характеристика (ЧКХ).

Метод ножа Фуко, разработанный в 1856 г. и широко применяемый в наши дни в оптической практике, используется преимущественно для технологического контроля в форме качественных оценок.

С помощью теневых методов поверхность деформаций волнового фронта визуализируется как полутоновая картина, позволяющая наглядно отображать деформации волнового фронта, по ним интуитивно оценивать характер преобладающих aberrаций или структуру ошибок обработки данной оптической поверхности.

Среди основных достоинств традиционных теневых методов ножа Фуко выделяются:

- 1) высокая чувствительность обнаружения ошибок поверхности (до  $0.1\lambda$ );
- 2) локализация ошибок поверхности и волнового фронта;
- 3) наглядность отображения структуры ошибок обработки данной поверхности;
- 4) простота и экономичность схемной реализации, невысокая стоимость установки;
- 5) малая чувствительность к вибрациям.

По простоте реализации метод ножа Фуко может рассматриваться как первый по-настоящему производственный способ [1].

Известные попытки создания количественных теневых методов не были успешными и не получили распространения в отечественной и зарубежной практике [2].

**Разработка количественного теневого метода ножа Фуко, реализуемого с помощью трансформации карты полутонового изображения в форму системы контуров – изофот.** В данной статье представлены результаты исследований, основанных на компьютерной трансформации изображения полутоновой теневой картины в систему изофот (топограмму функции распределения освещенности в исходной тенеграмме).

В результате дополнительной операции компьютерного наложения линейного фотометрического клина на исходную полутоновую тенеграмму, в процессе формирования карты изображения в форме системы контуров – изофот формируется изображение ряда параллельных полос. Это изображение можно рассматривать как геометрическую модель тенеграммы линейной решетки, которая может быть обработана в специально разработанной программе, созданной для расшифровки интерферограмм поперечного сдвига.

Расшифровка полученной модели тенеграммы линейной решетки позволяет измерять волновые aberrации и рассчитывать комплекс характеристик качества изображения исследуемой оптической системы. На рис. 1, *а* представлен кружок рассеяния, наполовину перекрытый ножом Фуко. На рис. 1, *б* представлен эскиз хода лучей в процессе формирования теневой картины ножа Фуко.

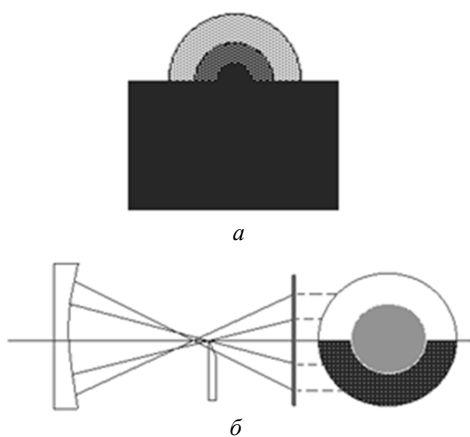


Рис. 1

**Экспериментальные исследования.** В качестве предмета исследования был выбран фотообъектив «Индустар-50». Изображение тенеграммы фотообъектива получено на созданной установке.

Для расчета функции волновых aberrаций и комплекса характеристик качества изображения исследуемой оптической системы необходимо получить и расшифровать пару теневых картин данной системы или детали, различающихся поворотом на  $90^\circ$  положения ножа Фуко и тест-объекта (в форме отрезка освещенной щели) относительно пятна рассеяния объектива по осям  $X$  и  $Y$ .

Необходимый результат был достигнут поворотом испытуемого объектива, установленного в держателе из комплекта оптической скамьи ОСК-2 ЦЛ, на угол  $90^\circ$ . Тест-объект и нож положения не меняли.

Разработанная схема конструкции компьютеризированной теневой установки для реализации предлагаемого метода представлена на рис. 2, где обозначены: 1 – лампа с прямоугольной спиралью; 2 – матированный конденсор; 3 – спектральная щель, перекрытая заслонкой, проходящей через оптическую ось; 4 – диафрагма для выделения рабочего участка щели; 5 – объектив коллиматора; 6 – исследуемая оптическая система в поворотном держателе; 7 – держатель ножа Фуко; 8 – объектив цифровой матричной фотокамеры [3].

Теневой прибор Фуко оснащен матричной фотокамерой, передающей оптическое изображение теневой картины ножа Фуко в компьютер, оснащенный программой формирования системы изофот и комплексом необходимого программного обеспечения.

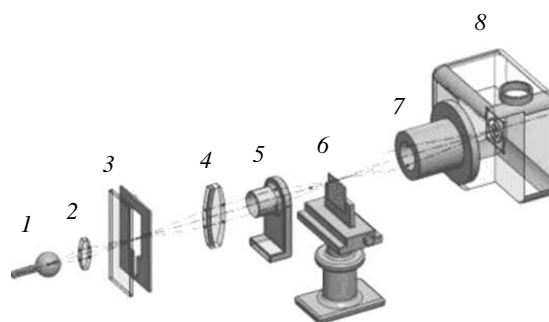


Рис. 2

Основные отличительные элементы данной оригинальной схемы контроля:

- в качестве тест-объекта взята полубесконечная щель по Филберу, которая впервые используется для количественного исследования aberrаций на базе изофотометрического теневого метода. Такой тест-объект обеспечивает пропорциональность освещенности в тенеграмме уровню поперечных aberrаций функции деформаций исследуемого волнового фронта;

– используется белый источник света, что создает возможность работы в белом свете, а также и в излучении ряда длин волн, выделяемых монохроматическими светофильтрами;

– узел для держателя объектива создает возможность поворота объектива на оптической оси на заданный угол без смещения с оси. Щель и нож при этом остаются на месте неподвижными.

На рис. 3 показаны элементы схемы контроля: 1 – блок тест-объекта типа «полубесконечная светящаяся линия», обеспечивающая пропорциональность освещенности в тенеграмме уровню поперечной aberrации функции деформаций исследуемого волнового фронта; 2 – лампа с прямоугольной спиралью (белый источник света); 3 – фокальный узел коллиматора.

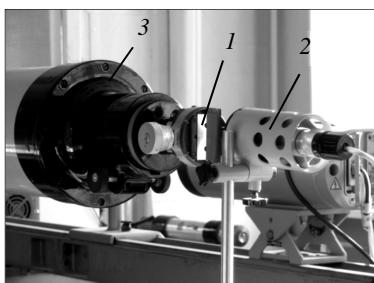


Рис. 3

На рис. 4 показаны: 1 – поворотный блок держателя исследуемого объектива; 2 – основание блока матричного регистратора; 3 – нож Фуко.

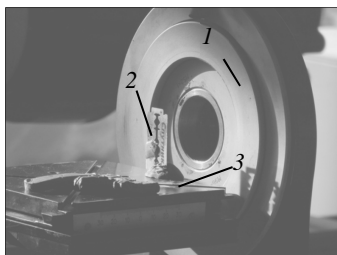


Рис. 4

Как указано, с помощью метода изофотометрии появляется возможность произвести трансформацию плавной функции распределения освещенности в теневой картине ножа Фуко в систему изофот, которая аналогична геометрической модели тенеграммы линейной решетки, например, системы полос Ронки. Далее две теневые картины Фуко данной системы или детали, различающиеся поворотом на  $90^\circ$  положения ножа Фуко и тест-объекта относительно пятна рассеяния объектива по осям  $X$  и  $Y$ , после изофотометрической обработки могут быть количественно расшифрованы в программе, созданной для расшиф-

ровки и математической обработки интерферограмм сдвига соответственно как две системы полос взаимно перпендикулярного сдвига [4].

**Алгоритм выполнения компьютерной обработки теневых картин.** Первым этапом обработки является фильтрация полученных теневых картин фотообъектива в программе «Adobe Photoshop», которая приводит к устранению шумов и способствует стабильной дальнейшей работе алгоритмов расшифровки.

Для настройки изофотограммы теневой картины на режим прямолинейных полос (по аналогии с классическим интерференционным методом, где прямолинейные полосы получаются введением фазового клина) в компьютерной программе дополнительно вводится амплитудный (фотометрический) клин. Эта операция является вторым этапом обработки теневых картин, также проводимым в программе «Adobe Photoshop».

Программа МБВК (многоуровневый блок выделения контура в изображении) используется в качестве инструмента для формирования карты как системы изолиний (изофот) теневой картины ножа Фуко (т. е. он создает измерительную шкалу прибора). В ходе настройки процесса многоуровневого оконтуривания выполняется регулировка частоты штрихов оконтуривания с помощью выбора и фиксации частоты оконтуривания на шкале рабочего окна экрана дисплея МБВК. Выбранное калибровкой значение частоты оконтуривания обеспечивает сопоставимость масштаба синтезированной модели рабочей теневой решетки с масштабом дублирующей лазерной интерферограммы того же исследуемого объектива. Откалиброванная установка далее используется в процессе производства. На рис. 5, а представлен этап оконтуривания теневой картины фотообъектива «Индустар-50», полученной при расположении ножа Фуко по оси  $X$ . На рис. 5, б представлен этап оконтуривания теневой картины фотообъектива «Индустар-50», полученной при расположении ножа Фуко по оси  $Y$ .

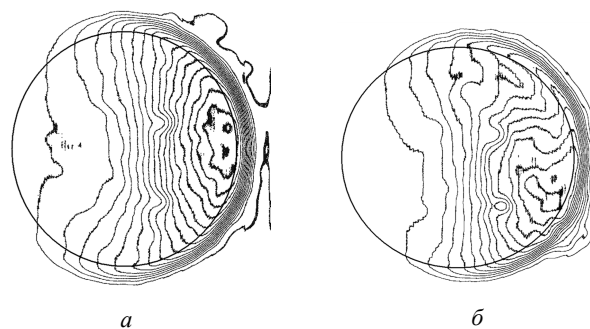


Рис. 5

Геометрические модели тенеграм линейной решетки экспериментально получены в процессе трансформации пары тенеграм в программе формирования системы изофот.

Для обеспечения дальнейшей количественной обработки применяется программа «Tiger», разработанная авторами ранее. Программа позволяет восстанавливать волновой фронт и анализировать результаты, обрабатывая полученную пару контурных карт тенеграм как пару интерферограмм сдвига, вводя их далее в программу обработки интерферограмм, с получением карты деформаций волнового фронта от исследуемой оптической системы или поверхности, таблицы коэффициентов Цернике, а также характеристик качества оптических систем, таких как ФРТ, ФРЛ и ЧКХ [4].

Результаты, полученные в программе «Tiger». На рис. 6 представлен профиль поверхности деформаций волнового фронта: 1 – направление по оси X; 2 – направление по оси Y. На рис. 7 представлена трехмерная диаграмма поверхности ошибок волнового фронта. На рис. 8 представлена частотно-контрастная характеристика для исследуемой поверхности: 1 – направление по оси X; 2 – направление по оси Y.

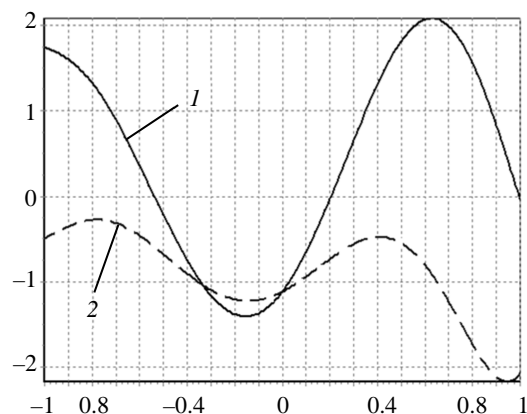


Рис. 6

Графики частотно-контрастной характеристики показывают, что разрешающая способность для заданного контраста (по критерию Фуко для исследования в проходящем свете (без автоколлимации))  $k' = 0.1$  составляет  $\approx 20$  лин/мм.

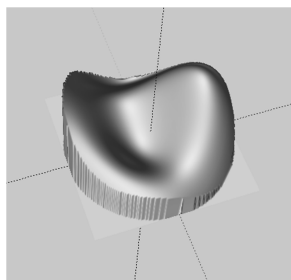


Рис. 7

Дополнительным этапом изофотометрического теневого метода является этап калибровки процесса оконтурирования для обеспечения сопоставимости результатов обработки

тенеграммы объектива (интерферограммы, сгенерированной по полученной таблице коэффициентов Цернике в программе «Zebra Simulator») с результатами контроля того же экземпляра исследуемого объектива на интерферометре Физо. На рис. 9, а представлена интерферограмма сдвига, полученная на интерферометре Физо. На рис. 9, б представлена интерферограмма, сгенерированная на основе коэффициентов Цернике, полученных при обработке тенеграммы изофотометрическим теневым методом.

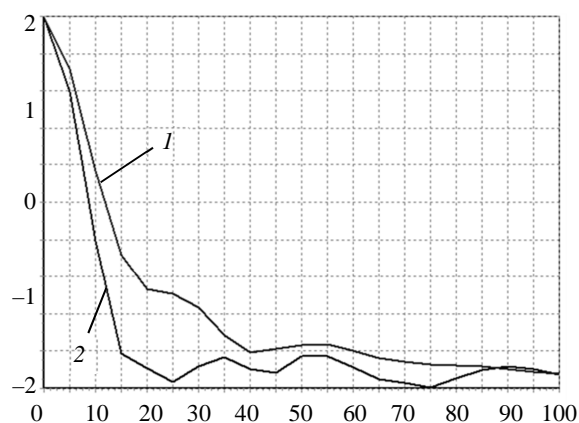


Рис. 8

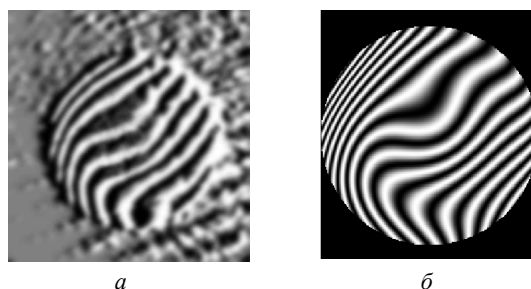


Рис. 9

Интерферограмма волновых aberrаций фотообъектива «Индустар-50», полученная при контроле на интерферометре Физо, в высокой степени согласуется с синтезированной интерферограммой волновых aberrаций, полученной путем подстановки комплекса коэффициентов Цернике, взятых с этапа обработки пары тенеграм фотообъектива «Индустар-50» предложенным теневым методом, прошедшим калибровку. Это, в свою очередь, указывает на достаточную степень достоверности изофотометрического теневого метода при определении деформаций волнового фронта исследуемой системы.

Как следствие, аналогичная достоверность характерна и для семейства количественных характеристик качества изображения исследуемой системы.

Таким образом, впервые в отечественной и зарубежной практике теневая картина, полученная предлагаемым компьютерным теневым методом, является источником не только качественной, но и исчерпывающей количественной информации для оценки и измерения характеристик качества исследуемой оптической системы и обрабатываемой оптической поверхности.

Разработанный теневой метод указывает на перспективы создания автоматизированного из-

мерительного комплекса контроля волновых aberrаций, а также ошибок прецизионных оптических поверхностей вместе с расчетом всех необходимых характеристик качества изображения, даваемого контролируемой системой. В частности, например, метод предполагает возможность контроля характеристик изображения, формируемого телескопом (или другой исследуемой системой), при контроле в процессе наблюдения с использованием излучения от наблюдаемого объекта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зацепина М. Е. Классический теневой метод ножа Фуко и модернизированный количественный теневой метод. Инновации в экономике, проектном менеджменте, образовании, юриспруденции, социологии, медицине, экологии, философии, психологии, физике, технике и математике: сб. науч. ст. по итогам Междунар. заочной науч.-практ. конф., г. Санкт-Петербург, 29–30 апр. 2013 г. СПб.: КультИнформПресс, 2013. С. 96–99.

2. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Систематизация и исследование количественных теневых методов: сб. тез. докл. конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. С. 23–24.

3. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Схемное решение установки для определения ошибок волнового фронта современным количественным теневым методом повышенной точности: сб. тр. Междунар. конф. и семинаров. Т. 1: «Оптика-2013». Т. 2: «Терагерцовая оптика и спектроскопия», «Оптические метаматериалы, фотонные кристаллы и наноструктуры», Санкт-Петербург, 14–18 окт. 2013 г. / под ред. проф. В. Г. Беспалова, проф. С. А. Козлова. СПб: НИУ ИТМО, 2013. С. 310–312.

4. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Современный количественный теневой метод с применением средств компьютерных технологий // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. 2013. № 2 (171). С. 226–230.

M. E. Zatsepina, V. K. Kirillovsky

*Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics*

### THE DEVELOPMENT OF MODERN QUANTITATIVE SHADOW METHOD OF ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF QUALITY OF THE OPTICAL SYSTEM

*The paper describes the algorithm of research developed by the modern quantitative shadow method of image quality given by the optical system. The method allows to carry out the quantitative assessment of the quality of the row parameters of the investigated optical system. The principle and installation scheme for realization of this method, as well as the theoretical basis of the method implementation are presented.*

**The shadow method, the Fuko knife-edge, the geometrical model of the shear cross interferogram, the method of izofotometry, the deformation of the wavefront**