

D. P. Lukyanov, S. Yu. Shevchenko, A. S. Kukaev, E. P. Filippova
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

ASSESSMENT OF USING OOFELIE::MULTIPHYSICS FOR MODELING SURFACE ACOUSTIC WAVE-BASED INERTIAL SENSORS

The possibility of using software OOFELIE::Multiphysics to perform computer modeling in LETI is discussed. The results obtained at the LINS department using the trial version of the system are shown.

CAE, surface acoustic waves, FEM-modeling, microaccelerometer

УДК 535.317.2

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

Исследование качества изображения объектива «Гелиос-44» количественным изофотометрическим теневым методом

Представлено экспериментальное исследование объектива «Гелиос-44». Представлены схема установки для реализации современного количественного теневого метода, а также описание этапов компьютерной обработки теневых картин в процессе реализации метода.

Теневой метод ножа Фуко, метод изофотометрии, качество изображения деформации волнового фронта, геометрическая модель интерферограммы поперечного сдвига, интерферограмма сдвига

Методы контроля ошибок обработки оптической поверхности можно разделить по принципу работы измерительного прибора на два типа: геометрические и волновые. К геометрическим методам относятся метод Гартмана и теневой метод Фуко, к волновым методам – интерферометрический метод контроля [1].

Классический теневой метод ножа Фуко, разработанный в 1856 г. и повсеместно применяемый в наши дни в оптической практике, состоит в получении пятна рассеяния от исследуемой системы, наполовину перекрытого непрозрачной заслонкой с прямолинейным лезвием – ножом Фуко.

Получаемая полутоновая картина пятна рассеяния наглядно отображает деформации волнового фронта, вызванные ошибками оптических поверхностей и aberrациями оптических систем, и визуально позволяет оценивать характер преобладающих ошибок обработки данной поверхности. На рис. 1, а представлен кружок рассея-

ния, наполовину перекрытый ножом Фуко. На рис. 1, б представлен эскиз хода лучей в процессе формирования теневой картины ножа Фуко.

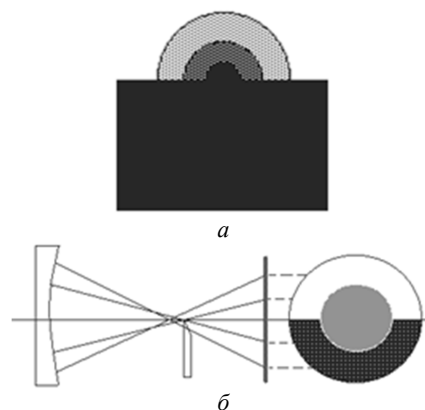


Рис. 1

Среди основных достоинств традиционных теневых методов ножа Фуко выделяются: высокая чувствительность обнаружения ошибок поверх-

ности (до 0.1λ), локализация ошибок поверхности и волнового фронта, наглядность отображения структуры ошибок обработки данной поверхности, простота и высокая экономичность схемной реализации, невысокая стоимость установки, малая чувствительность к вибрациям.

Главным недостатком метода является отсутствие возможности получения полной численной функции деформаций волнового фронта, нерешенность на практике задачи восстановления карты деформаций волнового фронта, что обуславливает применение метода преимущественно при технологическом контроле в форме качественных оценок состояния оптических поверхностей, aberrаций, дефектов оптических материалов, элементов и систем.

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

Принцип предлагаемого авторами современного количественного теневого метода ножа Фуко основывается на компьютерной изофотометрической трансформации плавной функции распределения освещенности полутоновой теневой картины в изображение системы полос, аналогичное 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).

Математическая модель для описания процесса формирования карты как системы изолиний (изофот) теневой картины ножа Фуко подобна модели механизма формирования классической интерферограммы (например, в схеме Тваймана или Физо). В обоих случаях используется разработанный ранее аппарат унифицированных функций преобразования, только в рассматриваемом случае примененный не к фазовым, а к амплитудным величинам. Предметом визуализации

является преобразование функции распределения освещенности в тенеграмме в систему полос как геометрическую модель тенеграммы линейной решетки. Такая система полос вводится в программу, созданную для расшифровки и обработки интерферограмм сдвига.

Волновая aberrация распределяется в выходном зрачке контролируемой системы по формулам [2]

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{TA_x}{r - W}, \quad \frac{\partial W}{\partial y} = -\frac{TA_y}{r - W},$$

где TA – поперечная aberrация, включающая расфокусировку и другие ошибки, измеряемая от оптической оси; r – радиус кривизны волнового фронта; $W(x, y)$ – функция деформаций волнового фронта.

Из формул следует, что поперечная aberrация луча пропорциональна первой производной функции деформации отклонения формы волнового фронта.

Анализ функций преобразования [3] метода изофотометрии тенеграммы ножа Фуко, дающего карту первой производной функции деформаций волнового фронта (что соответствует поверхности поперечных aberrаций), показывает, что относительная интенсивность в карте тенеграммы \tilde{I} связана с поверхностью поперечных aberrаций волнового фронта периодической зависимостью

$$I = \cos^2 \frac{\pi W_E}{\lambda_E}.$$

На рис. 2, *a* представлена карта тенеграммы (изофотограмма), сформированная до введения клина интенсивности. На рис. 2, *б* представлена карта тенеграммы (изофотограмма), сформированная при введении клина интенсивности. Обозначения величин на рис. 2: ΔW_E – интенсивность в изображении теневой картины, I – интенсивность в полученном трансформированном изображении теневой картины (карта тенеграммы); m' и M' – обозначения осей координат на тенеграмме.

Интенсивность в получаемом изображении, аналогичном геометрической модели тенеграммы линейной решетки, связана со структурой поверхности поперечных aberrаций исследуемого волнового фронта (aberrаций системы или первой производной поверхности ошибок полируемой оптической поверхности), представленных классической теневой картиной ножа Фуко.

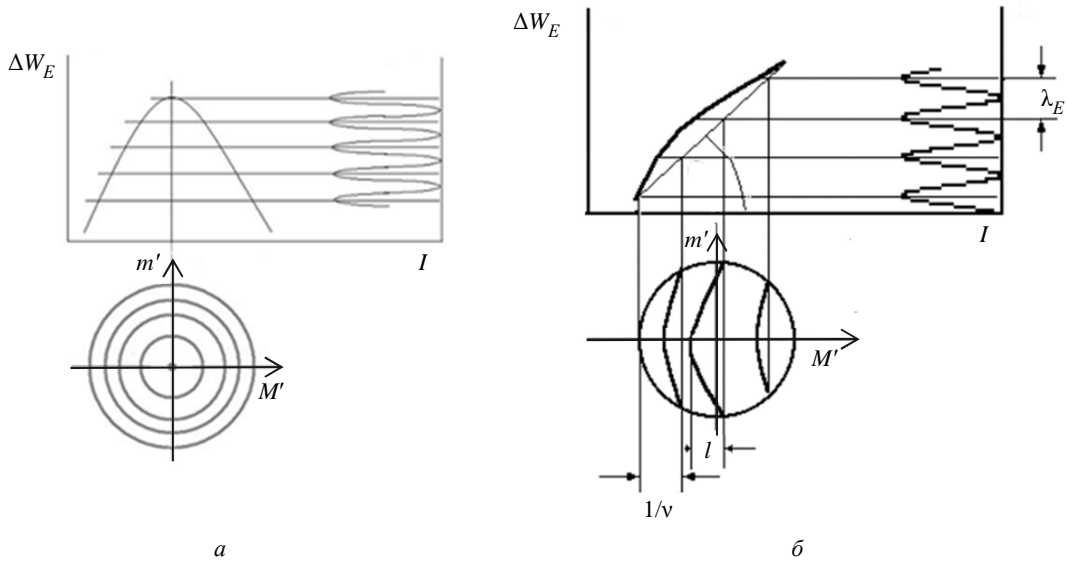


Рис. 2

На рис. 2, а центрально-симметричная функция, описывающая распределение освещенности в теневой картине, представляет собой совокупность точек поверхности по координатам обрабатываемой детали, каждая точка которой, как и функции по освещенности, соответствует первой производной функции деформации волнового фронта. Если поверхность не имеет ошибок, то первая производная в любой точке этой поверхности равна нулю, а теневая картина этой поверхности представляет собой равномерно засвеченный круг. Поверхность теневой картины отображает неравномерности освещенности в пятне рассеяния.

Для трансформации поверхности теневой картины в систему изофот используется функция преобразования, состоящая из ряда импульсов (такую функцию называют гребенка – comb).

Взаимодействие такой функции преобразования с функцией деформации волнового фронта такой формы приводит к тому, что каждый импульс этой функции, работая как нож, вырезает из этой трехмерной функции фотометрическое сечение. Контур каждого сечения есть изофота. Получаем линии, состоящие из точек равной освещенности, которые и называются изофотами.

Если данная функция представляет собой распределение освещенности в теневой картине, то в процессе трансформации получаем систему изофот – контурную карту, отображающую функцию распределения освещенности в теневой картине.

Если пятно рассеяния имеет приблизительно круглую форму, получаем систему контуров в виде замкнутых колец.

Введение в характеристику преобразования дополнительной координаты – заклон на угол θ (возникает несущая частота $\nu_E = \sin \theta / \lambda_E$) позволяет достичь качественного скачка, когда карта поперечных aberrаций волнового фронта (как система изолиний – «горизонталей» карты поперечных aberrаций с шагом дискретизации, заданным в программе генерации изофот) преобразуется в систему прямолинейных параллельных линий, расположенных друг от друга на равных расстояниях, соответствующих системе профилей поверхности поперечных aberrаций исследуемого волнового фронта.

Aberrации, передаваемые теневой картиной, отображаются на полосах как искривления. Координаты искривленных полос могут служить как информация для последующей расшифровки координат и расчета в численном виде функции деформации волнового фронта системы или ошибок исследуемой поверхности созданной ранее программе «Tiger» для обработки интерферограмм сдвига.

Функция преобразования изофотометра с клином интенсивности (по аналогии с функцией преобразования интерферометра с фазовым клином, вносимым поворотом образцового волнового фронта) принимает вид

$$\tilde{I} = \cos^2 [\pi(\nu_E y + \omega)],$$

где y – пространственная координата.

Анализ показывает ряд преимуществ, создаваемых здесь периодической характеристикой чувствительности, формирующей систему изолиний тенеграммы: 1) наглядное отображение карты

волнового фронта, где изолинии играют роль интерференционных полос (здесь они соответствуют поперечным аберрациям); 2) количественный характер метода, где карта тенеграммы удобна для прямых геометрических измерений координат положения полос, связанных (посредством поперечных аберраций) с исследуемыми ошибками волнового фронта.

Принцип восстановления волнового фронта при использовании двух геометрических моделей линейной решетки состоит в следующем: необходима регистрация и одновременная обработка двух решеток, полученных за счет изофотометрии двух тенеграмм при повороте ножа Фуко и тест-объекта Филбера на 90° .

Для восстановления двухмерной функции деформаций волнового фронта $W(x, y)$ необходимо и достаточно знать первые производные этих деформаций по двум взаимно перпендикулярным направлениям x и y . После этого функция деформаций волнового фронта $W(x, y)$ находится из решения системы дифференциальных уравнений [2].

Решение системы дифференциальных уравнений дает функцию полной поверхности деформаций волнового фронта $W(x, y)$.

Экспериментальное исследование. В качестве объекта исследования было решено использовать фотографические объективы, в частности исследовался объектив «Гелиос-44» с заводским номером 8981272. Предметом исследования явились аберрации объектива в коллиматорной схеме.

Для реализации изофотометрического теневого метода необходимо получение пары теневых картин при условии поворота полубесконечной щели, одновременно с ножом Фуко вокруг оптической оси на 90° при получении второй регистрируемой тенеграммы.

В работе авторами предложена инверсная модификация данного метода. Объектив устанавливается в держатель, предусматривающий возможность поворота на 90° вокруг своей оптической оси, совпадающей с оптической осью коллиматора. При этом повороте выполняется операция, эквивалентная одновременному повороту полубесконечной щели Филбера и ножа Фуко на требуемый угол (90°) вокруг своих оптических осей, также совпадающих с оптической осью коллиматора.

Лезвие ножа Фуко перекрывает пятно рассеяния, построенное исследуемым фотообъективом, проходя через оптическую ось и точку геометрического фокуса исследуемого объектива.

На рис. 3 представлена схема установки для реализации изофотометрического теневого метода [4], показаны: 1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – матовое стекло; 4 – тест-объект «полубесконечная щель» по Филберу; 5 – объектив коллиматора; 6 – исследуемый объектив; 7 – выходной зрачок исследуемого объектива; 8 – нож Фуко, перекрывающий изображение тест-объекта; 9 – объектив наблюдательной системы; 10 – матричная фотокамера; 11 – приёмник изображения; 12 – компьютер в режиме обработки тенеграммы.

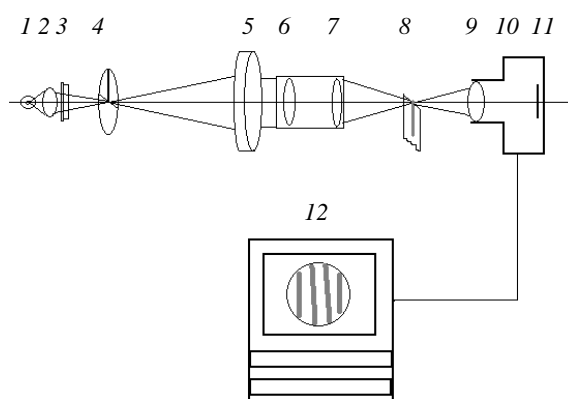


Рис. 3

Теневой прибор Фуко, собранный на базе коллиматорной скамьи, оснащён матричной фотокамерой, передающей оптическое изображение теневой картины ножа Фуко в компьютер, оснащённый программой, которая осуществляет многоимпульсную функцию преобразования типа «гребенка» и обеспечивает трансформацию полутонных пятен в контурную карту, состоящую из системы полос. Аберрации, передаваемые теневой картине, отображаются на полосах как искривления.

При наличии в схеме контроля значительных вибраций, а также при необходимости регулярной работы на интерферометре, используется компьютер с видеосистемой. Для устранения влияния вибраций телевизионное изображение движущейся интерференционной картины записывают в видеопамять, а затем наблюдают и расшифровывают изображение неподвижной интерферограммы, воспроизводимое с одиночного кадра [5].

При трансформации тенеграммы аппаратными предпосылками записи и количественной расшифровки теневых картин ножа Фуко, обеспечивающими линейную регистрацию аберраций в широком диапазоне как для сферических поверхностей с большими аберрациями на этапе формообразования, так и для контроля и аттестации прецизионных систем и поверхностей, являются:

1) использование тест-объекта типа «полубесконечная щель» с параллельными краями; 2) регистрация тенеграммы цифровой матричной камерой и ввод тенеграммы в компьютер для ее трансформации.

Обработка полученных теневых картин производится в несколько этапов, которые иллюстрируются представленными далее изображениями.

В качестве этапов предварительной обработки рассматриваются этап неглубокой пространственной фильтрации для удаления шумов из теневой картины и этап идентификации полос – программная расстановка точек вдоль полос с определением их координат и возможного порядка базиса аппроксимации контролируемого волнового фронта или оптической поверхности. Дальнейшая обработка основывается на серии математических операций с цифровыми массивами координат точек полос для интерпретации функций, целью которых является получение разложения волновых aberrаций или ошибок обрабатываемой поверхности по полиномам Цернике [3].

Первым этапом обработки является фильтрация полученных теневых картин в программе Adobe Photoshop, которая приводит к устранению шумов и способствует более стабильной дальнейшей работе алгоритмов расшифровки.

Эффективность фильтра шумов: фильтр действует на всей площади интерферограммы и может деформировать отдельные участки интерференционных полос, что увеличивает вероятность появления погрешности при определении функции деформаций волнового фронта.

Следующей операцией обработки теневых картин является компьютерная генерация линейного амплитудного фотометрического клина и его последующее наложение на изображения отфильтрованных тенеграм. Эта операция является вторым этапом обработки теневых картин, проводимым в программе Adobe Photoshop с помощью инструмента «градиент» в режиме «умножение». Инструмент «градиент» позволяет получить систему параллельных полос, искаженных только aberrациями волнового фронта. После этой операции выполняется обработка суммарного изображения. Создается система полос как геометрическая модель теневой линейной решетки.

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 многоуров-

невого 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.

Программа «Tiger», разработанная авторами ранее и использованная в данном исследовании, позволяет, обрабатывая попарно интерферограммы сдвига (в том числе полученные нами геометрические модели тенеграм линейной решетки), восстанавливать волновой фронт исследуемой поверхности и анализировать результаты с получением карты деформаций исследуемого волнового фронта, таблицы коэффициентов Цернике, а также характеристик качества оптических систем, таких как ФРТ, ФРЛ и ЧКХ в пятне рассеяния [5].

Дальнейшая обработка в программе «Tiger» дает следующие результаты. На рис. 4 представлен профиль поверхности деформаций волнового фронта: 1 – направление по оси x ; 2 – направление по оси y . На рис. 5 представлена частотно-контрастная характеристика для исследуемой поверхности: 1 – направление по оси x ; 2 – направление по оси y .

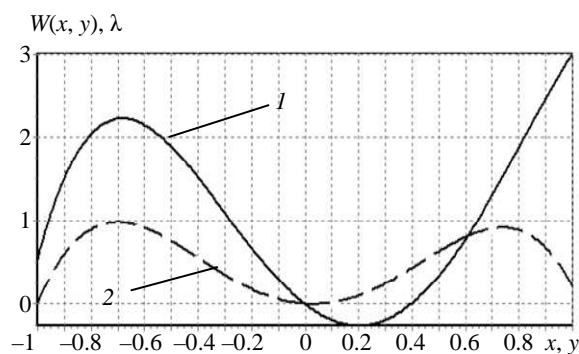


Рис. 4

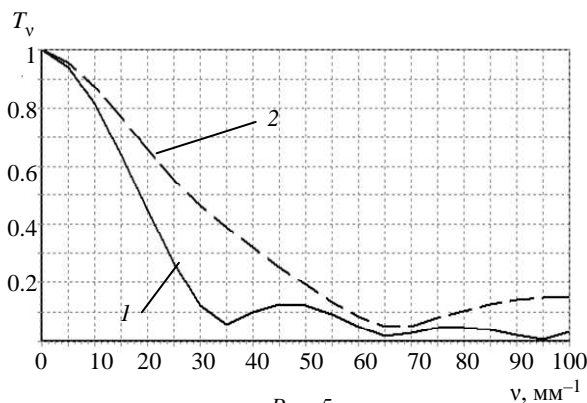


Рис. 5

Графики ЧКХ показывают, что разрешающая способность для заданного контраста (по критерию Фуко) $k' = 0.2$ составляет ≈ 25 лин/мм.

Данные таблиц указывают 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.

Калибровка. Точность контроля, даваемая разработанным количественным теньвым методом, соответствует точности контроля объективов на интерферометрах в условиях производства.

Точность, которую обеспечивает расшифровка интерферограммы, соответствует $1/10$ шага интерференционной полосы. На практике – это точность на уровне $\lambda/10$.

Калибровка данного метода выполняется путем сопоставления результатов обработки изофотометрической тенеграммы с классической интерферограммой (например, Физо), полученной при контроле того же объектива. При калибровке прибора шаг дискретизации согласуется с периодом интерференционных полос при исследовании той же оптической системы на классическом интерферометре типа Тваймана или Физо.

На рис. 6, *a* представлена интерферограмма, полученная на интерферометре Физо. На рис. 6, *б* представлена интерферограмма, сгенерированная на основе коэффициентов Цернике, полученных при обработке тенеграммы изофотометрическим теньвым методом.

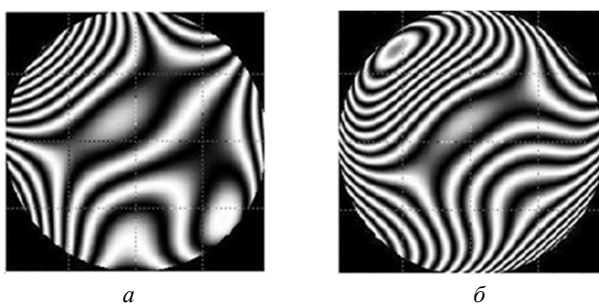


Рис. 6

В случае отклонения конфигурации интерфе-

Тип и № объектива	Интерферограмма	RMS		Peak-to-valley
«Гелиос-44» 8981272	<i>a</i>	RMS = 1.435 Цена шага интерференционной полосы интерферограммы Физо составляет $\lambda/2$, поэтому в данном случае RMS необходимо считать $1.435/2 = 0.7175$		10.703
	<i>б</i>		RMS = 0.747	4.000

программы, синтезированной по изофотам теневой картины, выполняется подбор коэффициентов Цернике, обеспечивающих подобие синтезированной и классической тенеграммы.

В таблице представлены сравнительные значения RMS и Peak-to-valley.

Соотношение значений RMS для интерферограммы, полученной на интерферометре Физо (таблица, *a*), и интерферограммы, сгенерированной изофотометрическим теньвым методом (таблица, *б*) равно 0.96, отличие от 1 составляет 0.04, что в данной ситуации можно считать пренебрежимо малым значением.

Таким образом, разработанный теньвой изофотометрический метод можно уверенно полагать предназначенным и пригодным для технических измерений aberrаций прецизионных оптических систем.

Таким образом, предложенный количественный теньвой метод открывает существенно новые возможности для оптических исследований, выполняемых сегодня традиционными теньвыми методами. Благодаря преобразованию тенеграммы в изображение системы полос, аналогичных геометрической модели интерферограммы сдвига, и ее последующей компьютерной обработке обеспечивается получение полной карты деформаций волнового фронта.

Метод и аппаратура отличаются исключительной простотой и экономичностью при высокой точности и информативности, что создает условия для перехода прецизионной оптической продукции на новый уровень качества при одновременной распространенности и доступности.

Чувствительность к ошибкам поверхностей и aberrациям оптических систем повышается в 5–10 раз благодаря контурной трансформации теневой картины и автоматизации процесса расшифровки системы полос, что обеспечивает возможность оптических измерительных наводок и повышает их точность.

Разработанный теньвой метод указывает на перспективы создания автоматизированного измерительного комплекса контроля волновых aberrаций, а также ошибок прецизионных опти-

ческих поверхностей вместе с расчетом всех необходимых характеристик качества изображения, даваемого контролируемой системой. В частности, метод дает возможность контроля характери-

стик изображения, формируемого телескопом (или другой исследуемой системой), при контроле в процессе наблюдения с использованием излучения от наблюдаемого объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Оптический производственный контроль / под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
3. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 5: Аберрации и качество изображения. СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2008. 115 с.
4. 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.: НИУИТМО, 2013. С. 310–312.
5. Кирилловский В. К., Ле Зуй Туан. Оптические измерения. Ч. 6: Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2008. 131 с.

M. E. Zatsepina, V. K. Kirillovsky

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

THE EXPERIMENTAL STUDY OF IMAGE QUALITY OF CAMERA LENS BY QUANTITATIVE IZOFOTOMETRY SHADOW METHOD

The paper presents the experimental study of camera lens Helios-44. The installation scheme, as well as the description of the stages of computer processing of shadow patterns for realization of the method are presented.

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