

Сведения об авторах**Сергей Михайлович Борзов**

— канд. техн. наук; Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, лаборатория информационной оптики, Новосибирск; заведующий лабораторией; E-mail: borzov@iae.nsk.su

Олег Иосифович Потатуркин

— д-р техн. наук, профессор; Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск; заместитель директора по научной работе; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет; E-mail: potaturkin@iae.nsk.su

Рекомендована ученым советом
ИнститутаПоступила в редакцию
22.03.13 г.

УДК 535.317.2

М. Е. ЗАЦЕПИНА, В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ

**РЕАЛИЗАЦИЯ
СОВРЕМЕННОГО КОЛИЧЕСТВЕННОГО ТЕНЕВОГО МЕТОДА**

Представлен оригинальный количественный теневой метод, основанный на преобразовании теневой картины ножа Фуко в геометрическую модель тенеграммы линейной решетки. Результатами количественной оцифровки и компьютерной обработки геометрической модели являются карта ошибок волнового фронта и характеристики качества изображения, формируемого исследуемой оптической системой.

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

Введение. Существующий визуальный теневой метод ножа Фуко, разработанный в 1856 г. и широко применяемый в наши дни в оптической практике, позволяет по полутоновой картине наблюдать деформации волнового фронта и по ним оценивать характер преобладающих аберраций данной оптической системы. Метод ножа Фуко используется преимущественно для технологического контроля в виде качественных оценок состояния оптических элементов и систем. Метод позволяет лишь в ограниченном объеме производить количественные оптические измерения поперечных аберраций и не позволяет получать полную топограмму (контурную карту) волнового фронта для последующей обработки в целях расчета характеристик качества оптического изображения [1].

Посредством компьютерного наложения на исходную теневую картину (тенеграмму) линейного фотометрического клина можно программно сформировать изображение системы параллельных полос с отдельными искривлениями. Это изображение можно рассматривать как геометрическую модель тенеграммы линейной решетки. Расшифровка полученной модели тенеграммы линейной решетки позволяет измерять волновые аберрации и рассчитывать характеристики качества изображения, формируемого исследуемой оптической системой.

Экспериментальные исследования. Схема установки, разработанной для реализации предлагаемого изофотометрического теневых метода, представлена на рис. 1 [2], где 1 — лампа, 2 — конденсор, 3 — матовое стекло, 4 — тест-объект „полубесконечная щель“, 5 — объектив коллиматора, 6 — исследуемый объектив (фотообъектив Индустар-50), 7 — выходной зрачок исследуемого объектива, 8 — нож Фуко, перекрывающий изображение тест-объекта, 9 — объектив регистрирующей фотокамеры, 10 — матричная камера, 11 — приемник изображения, 12 — компьютер.

Теневой прибор Фуко оснащен матричной фотокамерой, передающей оптическое изображение теневой картины ножа Фуко в компьютер, который содержит программу формирования системы изофот и комплекс программного обеспечения для обработки результатов контроля.

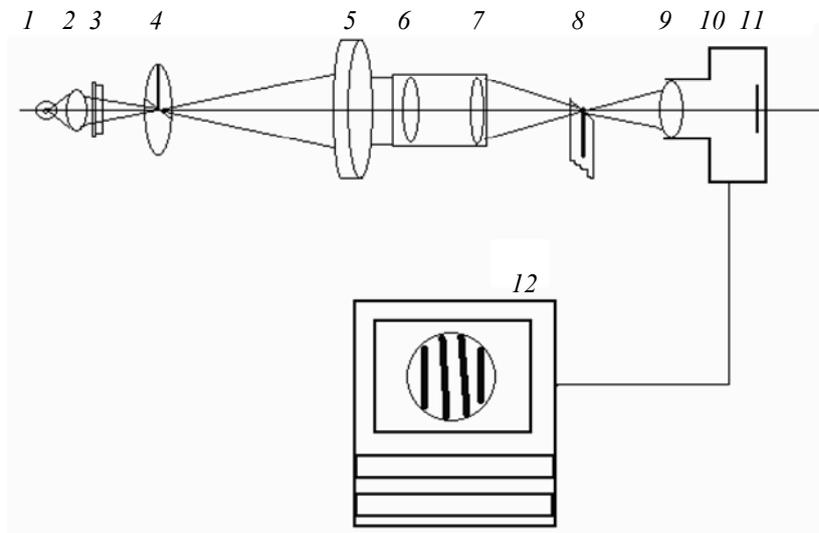


Рис. 1

Перечислим основные отличительные особенности данной оригинальной схемы.

1. Тест-объектом служит полубесконечная щель по Филберу [3], 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.

2. Используемый источник света — лампа накаливания, работающая с пониженным напряжением.

3. Узел крепления исследуемого объектива обеспечивает возможность его поворота на заданный угол без смещения с оптической оси. При этом положения тест-объекта и края ножа Фуко при работе не изменяются, что упрощает методику исследований.

Для расчета функции волновых aberrаций и характеристик качества изображения, формируемого исследуемой оптической системой, необходимо расшифровать две теневые картины, полученные при повороте ножа Фуко и тест-объекта вокруг оптической оси на 90° . Лезвие ножа Фуко проходит через точку геометрического фокуса на оптической оси установки, плоскость ножа нормальна к оптической оси. Тест-объект („полубесконечная щель“) представляет собой отрезок освещенной щели с параллельными краями, перекрытой непрозрачной заслонкой; край заслонки расположен по нормали к краям щели.

Использование метода изофотометрии позволяет произвести трансформацию плавной функции распределения освещенности в теневой картине ножа Фуко в систему контуров изофот функции распределения освещенности в тенеграмме.

Две теневые картины Фуко, одна из которых получена при повороте ножа на 90° , после выделения изофот трансформируются в две картины полос, подобные теневым картинам Ронки. Следовательно, две картины полос могут быть количественно расшифрованы в программе, созданной ранее для обработки соответствующих интерферограмм поперечного сдвига.

Первым этапом обработки является фильтрация полученных теневых картин в программе Adobe Photoshop, что позволяет устранить шумы тенеграммы и способствует более стабильной работе алгоритмов расшифровки. На рис. 2 показаны теневые картины, полученные в результате фильтрации, при расположении ножа Фуко по оси X (а) и по оси Y (б).

Итак, для настройки изофотограммы теневой картины на режим прямолинейных полос (по аналогии с классическим интерференционным методом, где прямолинейные полосы получаются путем введения фазового клина) выполняется компьютерное наложение фотометрического (амплитудного) клина на исходную теневую картину. Эта операция является вторым этапом обработки теневых картин [4] (также в программе Adobe Photoshop): см. рис. 3 — *a* — при расположении ножа Фуко по оси X , *б* — по оси Y .

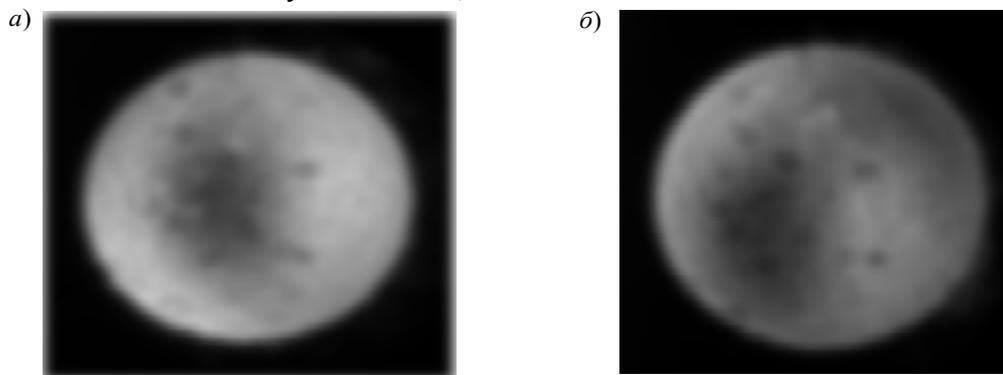


Рис. 2

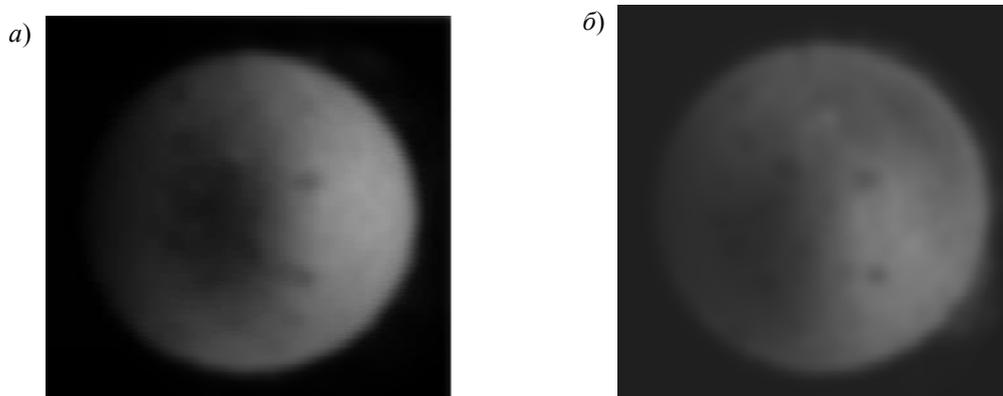


Рис. 3

В качестве инструмента для формирования контурной карты как системы изофот теневой картины ножа Фуко использовалась программа МБВК (многоуровневый блок выделения контура в изображении), разработанная на кафедре прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Экспериментально полученные геометрические модели тенегрмм линейной решетки в процессе формирования системы изофот показаны на рис. 4 (*a* — при расположении ножа Фуко по оси X , *б* — по оси Y).

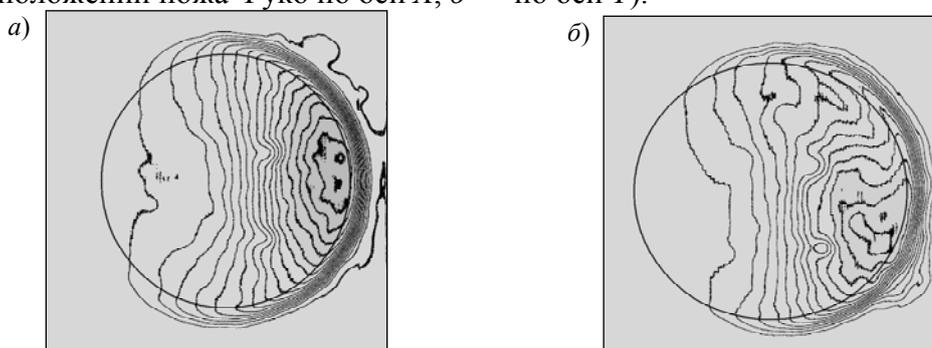


Рис. 4

Для дальнейшей количественной обработки была применена программа “Tiger” [4], позволяющая восстанавливать волновой фронт и анализировать результаты путем обработки двух тенегрмм как интерферограмм (с указанным направлением сдвига) с получением карты

деформаций волнового фронта исследуемой оптической системы, таблицы коэффициентов Цернике, а также характеристик качества оптических систем, таких как функция рассеяния точки, функция рассеяния линии, частотно-контрастная характеристика и функция концентрации энергии в пятне рассеяния [2].

Программа “Tiger” обладает существенным преимуществом, состоящим в повышении точности определения координат точек при расшифровке системы полос в 5—10 раз по сравнению с возможностями других распространенных программ расшифровки интерферограмм.

Обработка тенеграмм линейной решетки в программе “Tiger” позволила получить:

- профиль волнового фронта $W(X, Y)$ (рис. 5, а);
- трехмерную диаграмму поверхности волновых aberrаций (рис. 5, б);
- таблицу коэффициентов Цернике (рис. 6, а);
- график частотно-контрастной характеристики $T(\nu)$ (рис. 6, б), показывающий, что разрешающая способность объектива для заданного контраста (по критерию Фуко) $T(\nu)=0,2$ составляет ≈ 30 лин/мм.

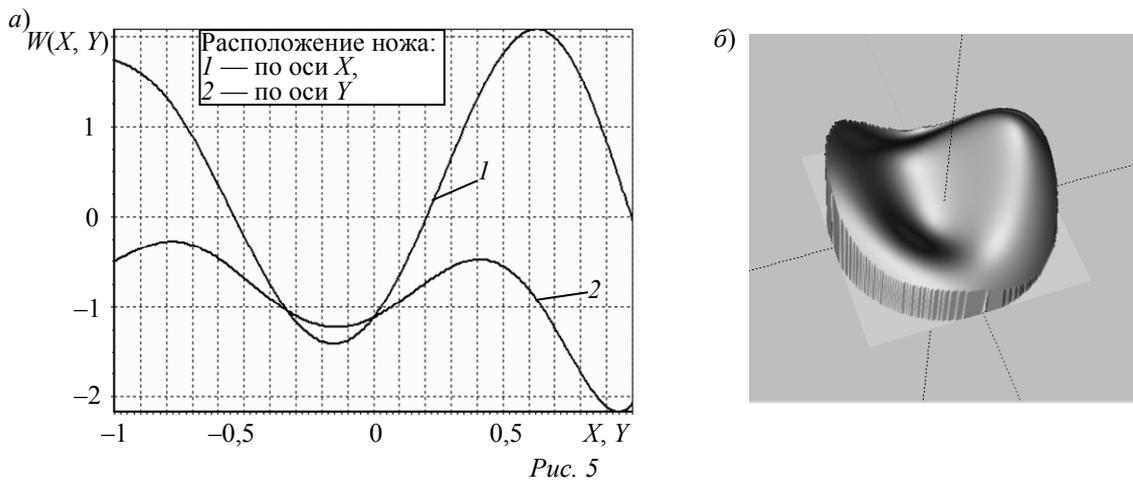


Рис. 5

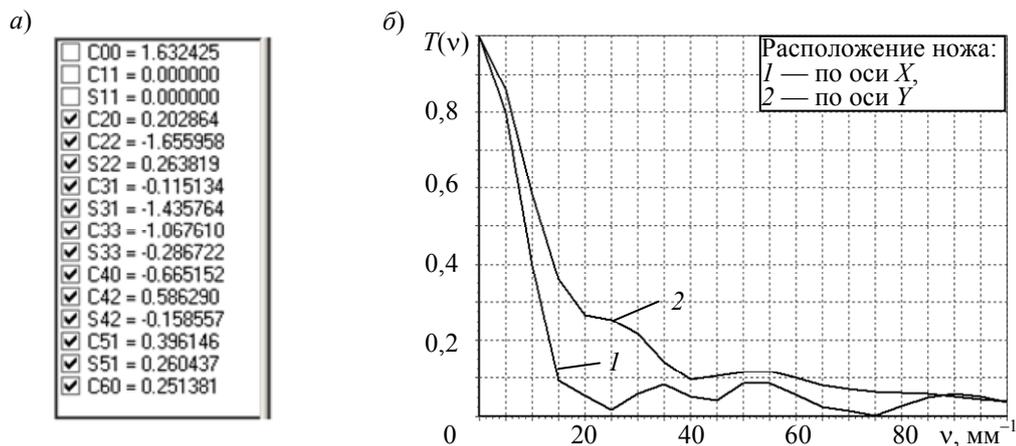


Рис. 6

Таким образом, использование предлагаемого метода позволяет при обработке теневой картины получить не только качественную, но и исчерпывающую количественную информацию для оценки и измерения характеристик качества исследуемой оптической системы и оптической поверхности.

Дополнительным этапом изофотометрического теневого метода (для наглядного отображения и калибровки метода и компьютерной изофотометрической аппаратуры) является этап сопоставления интерферограммы исследуемого объектива Индустар-50, полученной

экспериментально на интерферометре Физо (рис. 7, а), и интерферограммы этого же объектива, синтезированной в программе Zebra Simulator (рис. 7, б) с применением массива коэффициентов Цернике (см. рис. 6, а).

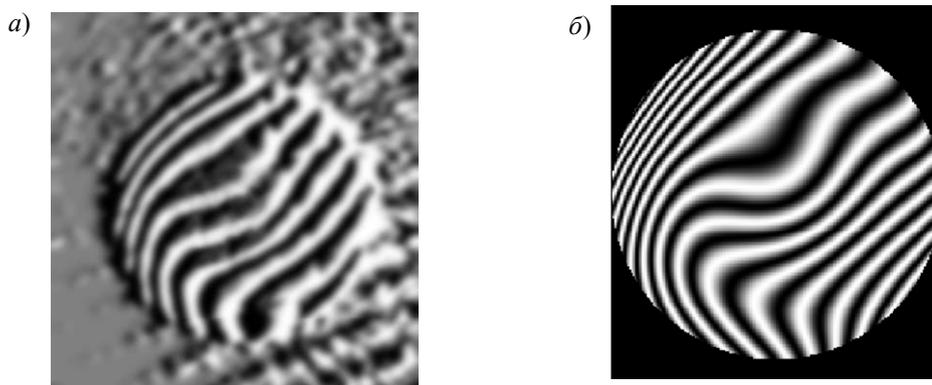


Рис. 7

Анализ рис. 7 отчетливо показывает, что интерферограмма, полученная при контроле на интерферометре Физо, в высокой степени подобна синтезированной интерферограмме. Это, в свою очередь, указывает на высокую степень достоверности изофотометрического теневого метода при определении деформаций волнового фронта исследуемой системы и, как следствие, количественных характеристик качества изображения, формируемого теневой системой.

Заключение. Предложенный и разработанный количественный изофотометрический теневой метод в современной компьютерной реализации указывает перспективы создания на основе теневого метода ножа Фуко автоматизированного измерительного комплекса для контроля волновых aberrаций и ошибок прецизионных оптических поверхностей, а также для расчета необходимых характеристик качества изображения, формируемого контролируемой системой.

Кроме того, следует отметить, что при использовании метода Ронки необходимо с повышением точности контролируемой оптической системы повышать частоту решетки, что сопровождается раздвоением картины зрачка вплоть до исчезновения интерферограммы. Разработанный метод изофотометрии тенеграммы ножа Фуко преодолевает этот недостаток метода Ронки. Согласно исследованиям Д. Д. Максудова [5], чувствительность контроля теневыми методами может достигать уровня $1/20$ — $1/30$ длины волны, что позволяет судить о соответствующей точности исследований, проводимых изофотометрическим теневым методом.

Предложенный метод компьютерной изофотометрии может быть применен при разработке теневых установок нового поколения, отличающихся простотой, высокой скоростью (работа в реальном времени) и высокой точностью (погрешность менее 5 %), возможностью работы на любой выделенной длине волны, а также малой чувствительностью к вибрациям (в отличие от подавляющего большинства применяемых интерферометров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Современный количественный теневой метод с применением средств компьютерных технологий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 2(171). С. 226—230.
2. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Схемное решение установки для определения ошибок волнового фронта современным количественным теневым методом повышенной точности // Сб. тр. Междунар. конф. „Оптика—2013“. СПб: НИУ ИТМО, 2013. С. 310—312.
3. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 5. Аберрации и качество изображения. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 115 с.

4. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения: Учеб. пособие. СПб: Изд-во „Лань“, 2010. 304 с.
5. Максудов Д. Д. Изготовление и использование астрономической оптики. М.: Наука, 1984. 272 с.

Сведения об авторах**Марина Евгеньевна Зацепина**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: marichka_za@list.ru

Владимир Константинович Кирилловский

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: vkkir@mail.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
30.12.13 г.

УДК 681.078

А. Н. ЛИПАТОВ, А. П. ЭКОНОМОВ, В. С. МАКАРОВ, Г. В. ЗАХАРКИН,
Д. Л. БОГАЧЕВ, Д. М. РУМЯНЦЕВ, С. А. АНТОНЕНКО

КАМЕРА-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТА

Рассматривается оптоэлектронный прибор, предназначенный для исследования минералогического состава различных типов грунта и, в частности, определения минералогического состава и структуры лунного грунта (реголита). Представлен используемый для решения поставленной задачи совмещенный метод спектрального и импульсного люминесцентного анализа на основе одного детектора.

Ключевые слова: оптический спектрометр, интерференционные фильтры, оптическая матрица, люминесцентный анализ, минералогический состав.

Введение. Минералогический состав грунта полярных областей Луны не исследовался посадочными аппаратами. В рамках текущих проектов „Луна-Глоб“ (запуск в 2015 г.) и „Луна-Ресурс“ (запуск в 2017 г.) предполагается проведение таких исследований. Для этих целей разработан прибор, позволяющий в окружающем посадочный аппарат пространстве рассмотреть значительную часть поверхности (на сотни метров вокруг посадочной станции). При небольшом поле зрения прибора это достигается путем механической развертки, поэтому могут быть исследованы значительные участки поверхности, а некоторые участки окружающего ландшафта, включая отдельно лежащие камни, расположенные вблизи (до 1...2 м), могут быть исследованы с очень высоким пространственным разрешением.

Методы исследования минералогического состава грунта в видимом диапазоне с помощью многополосного фотометра (или спектрометра) [1] и фотолюминесцентного анализа [2] используются достаточно давно как на Земле, так и в космосе. Тем не менее для исследования Луны совмещенный анализ не применялся. Как известно, люминесцентный анализ необычайно чувствителен. С его помощью можно обнаружить в пробе наличие вещества с концентрацией $\sim 10^{-10} \dots 10^{-11}$ г/г. Совместное применение двух методов расширяет возможности прибора в целом, что позволяет с высокой вероятностью по полученным спектрам восстановить истинный минералогический состав исследуемого грунта.