

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ СХЕМЫ РОНКИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСШИФРОВКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

© 2009 г. Ле Зуи Туан; В. К. Кирилловский, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: DuyTuanKTQ@yahoo.com, Vkkir@mail.ru

Целью данной работы стали модернизация и компьютеризация интерферометра с дифракционной решеткой на основе схемы Ронки. Достоинства интерферометра: простота и надежность, нечувствительность к вибрациям, возможность использования нелазерного источника с освещением белым светом или светом с выделением любой длины волны (при контроле хроматизма), отсутствие эталонной оптической поверхности.

Для компьютерной обработки интерферограмм, полученных на дифракционном интерферометре с решеткой, разработана программа "Tiger", которая позволяет автоматически расшифровывать интерференционные полосы, рассчитывать деформации волнового фронта и характеристики качества изображения оптической системы, такие как функция рассеяния точки (ФРТ), функция рассеяния линии (ФРЛ) и функция передачи модуляции (ФПМ) или частотно-контрастная характеристика (ЧКХ).

Коды OCIS: 120.0120.

Поступила в редакцию 07.10.2008.

### Введение

В последнее время наряду с классическими интерферометрами, построенными по принципу деления амплитуды световой волны и применения образцового волнового фронта, ведутся работы по созданию и применению интерферометра, построенного по принципу сдвига раздвоенного по амплитуде рабочего волнового фронта. Внимание исследователей к этим приборам привлечено главным образом благодаря их высокой устойчивости к вибрациям. Кроме того, приборы по таким схемам не требуют использования эталонных оптических поверхностей и позволяют вести контроль при освещении белым светом или с выделением любой длины волны.

Данная работа посвящена усовершенствованию интерферометров сдвига на базе применения низкочастотной дифракционной решетки в целях контроля оптики микроскопов. Данный принцип был предложен в начале прошлого века итальянским ученым Васко Ронки для контроля астрономических систем.

Наблюдая интерферограмму Ронки, легко получить качественное представление о деформации волнового фронта и соответственно о погрешностях контролируемой поверхности или аберрациях исследуемой оптической системы. Примеры интерферограмм Ронки и соответствующие им погрешности поверхностей показаны в работе Малакары [1].

### Принцип метода

Принцип действия интерферометра [2, 3] состоит в наложении двух взаимно когерентных сферических волновых фронтов в режиме интерференции сдвига (рис. 1).

Сферическая волна, сформированная исследуемой оптической системой, имеющая центр кривизны в точке  $P$ , падает на линейную решетку  $R$ , установленную нормально к оптической оси вблизи плоскости фокусировки тест-объекта "светящаяся точка". Решетка имеет пространственную частоту  $m$  и отстоит от центра кривизны сферической волны на расстояние  $y$ . Это расстояние считается положительным, если отсчет производится в направлении, обратном направлению распространению света. При этом по обеим сторонам от точки  $P$  об-

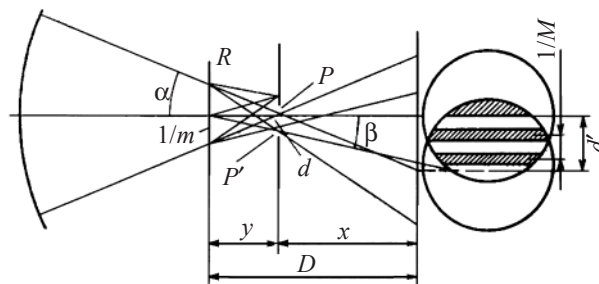


Рис. 1. Схема формирования интерферограммы Ронки.

разуются дифракционные спектры различных порядков, имеющие для монохроматического света вид точек. Расстояние между спектрами для малых углов дифракции равно  $d = y\beta$ , где  $\beta = m\lambda$  – угол дифракции. Отсюда  $d = ym\lambda$ .

Итак, решетка порождает ряд дифрагированных волн. Из всей совокупности дифрагированных фронтов диафрагмой выделяются только два соседних фронта, повернутых на угол  $\beta_c$  и смещенных на расстояние  $d$  один относительно другого.

После концентрации в точках  $P$  и  $P'$  сферические фронты расходятся, образуя в той области пространства, где они перекрываются с наклоном на угол  $\beta' = d/x$ , интерференционные полосы.

Частота интерференционных полос связана с частотой решетки соотношением [2]

$$M = my/x.$$

При отсутствии деформаций наложенных фронтов эти полосы прямолинейны, параллельны и находятся друг от друга на равных расстояниях.

Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть результат сложения и интерференции сдвига рабочей волны, раздвоенной в результате дифракции на решетке и несущей информацию об аберрациях исследуемой оптической системы.

### Схема установки

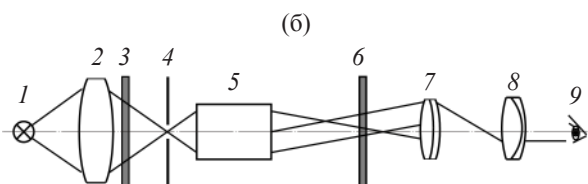
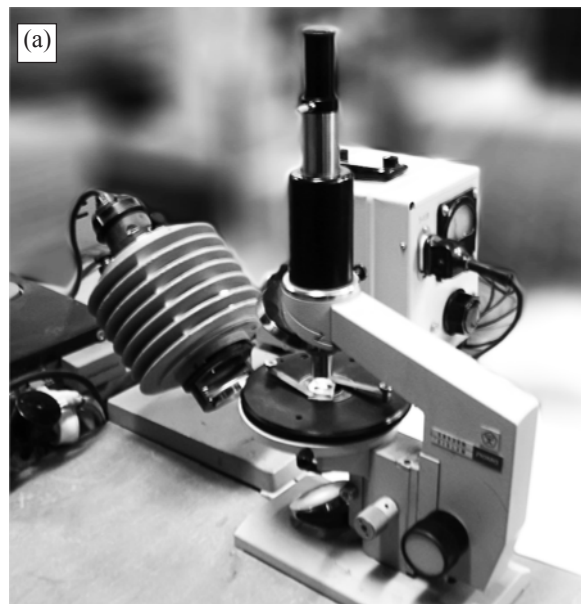
Данная работа была направлена на решение такой актуальной задачи, как модернизация интерферометра на базе схемы Ронки (рис. 2), что способствовало бы расширению возможностей данного прибора и упрощению обработки результатов.

Традиционный интерферометр на базе схемы Ронки рассчитан на визуальное восприятие интерферограмм. В этом случае можно судить о максимальных ошибках поверхности по стрелкам прогиба полос. Такого анализа не всегда бывает достаточно, и возникает необходимость прибегнуть к специальным компьютерным программам, предназначенным для более полного и точного анализа.

Проблему компьютеризации интерферометра на базе схемы Ронки можно решить, оснастив его цифровой фотокамерой.

Цифровая фотокамера в схеме прибора заменяет глаз наблюдателя, что позволяет получать фотографии интерференционных картин. Таким образом создается возможность оперативного ввода информации в компьютер для последующей обработки.

Следует отметить, что компьютеризация интерферометра на базе схемы Ронки предоставляет и другие возможности. Так, например, можно исполь-



**Рис. 2.** Интерферометр для контроля оптики микроскопа. а – общий вид установки, б – принципиальная схема интерферометра. 1 – лампа, 2 – конденсор, 3 – светофильтр, 4 – точечная или щелевая диафрагма, 5 – исследуемый микрообъектив, 6 – дифракционная решетка, 7 – объектив наблюдательной системы, 8 – окуляр наблюдательной системы, 9 – глаз наблюдателя или регистрирующая камера.

зовать графический редактор для улучшения качества полученных изображений интерферограмм. На фотографиях интерферограмм можно инструментально измерить ошибки волнового фронта по прогибам полос, в том числе используя персональный компьютер. Возможно хранение и систематизация данных.

В данной работе использовалась цифровая фотокамера *Olympus Camedia C-370*. Эта камера оснащена зум-объективом ( $f'_{ог} = 5,8-17$  мм;  $1/2,9-1/5,0$ ;  $3,2\times$ ) и имеет переменный угол поля зрения. Таким образом, создается возможность оптимизировать масштаб и качество изображения интерференционных картин для исследуемых оптических систем и поверхностей различных апертур.

В процессе работы был исследован макет модернизированного интерферометра на базе схемы Ронки, позволяющего проводить полноценные и подробные исследования. Были получены качественные цифровые фотографии интерферограмм. Результаты исследований приведены далее.

## Принцип восстановления волнового фронта при обработке интерферограмм Ронки

Основная формула для геометрической модели метода Ронки [1, 4]

$$\frac{\partial w \cos \varphi}{\partial x} - \frac{\partial w \sin \varphi}{\partial y} = -\frac{nd}{r}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол между линиями решетки и осью  $y$ ,  $r$  – радиус кривизны волнового фронта,  $w$  – деформация волнового фронта,  $x$  и  $y$  – координаты, нормальные к оптической оси,  $n$  – номер полосы.

При  $\varphi = 0$ , то есть когда линии параллельны оси  $y$ , интерферограмма по этой оси описывается формулой

$$\frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{nd}{r}. \quad (2)$$

Координата интерференционной полосы Ронки в этом случае зависит только от первой производной волнового фронта по направлению  $x$ , поэтому при ее обработке получается

$$f_1(x, y) = \partial w / \partial x.$$

Подобным образом при обработке интерферограммы, полученной в случае, когда линии решетки параллельны оси  $y$  ( $\varphi = 90^\circ$ ), имеется

$$f_2(x, y) = \partial w / \partial y.$$

Таким образом, при обработке интерферограммы по двум направлениям рассматривается система дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} = f_1(x, y) \\ \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} = f_2(x, y) \end{cases}. \quad (4)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (4) дает полную поверхность деформации волнового фронта  $w(x, y)$ . Система уравнений (4) решается численным методом Рунге–Кутты. При этом необходимо выбрать начальное условие.

Удобно выбрать  $w|_{x=0, y=0} = 0$ .

Схема алгоритма обработки интерферограмм Ронки показана на рис. 3. Она позволяет восстанавливать функцию деформации волнового фронта, обрабатывая две интерферограммы Ронки, полученные при ориентации решетки последовательно по двум направлениям, и далее – анализировать результаты для получения характеристик качества оптических систем, таких как, например, ФРТ, ФРЛ и ЧКХ.

Для иллюстрации и проверки работы программы можно рассмотреть (рис. 4, 5) пример обработ-

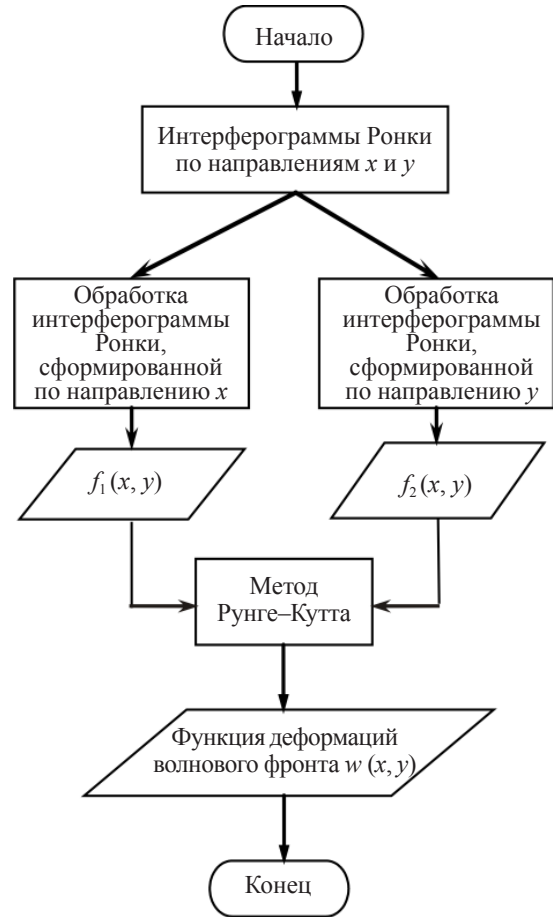


Рис. 3. Алгоритм обработки интерферограмм Ронки.

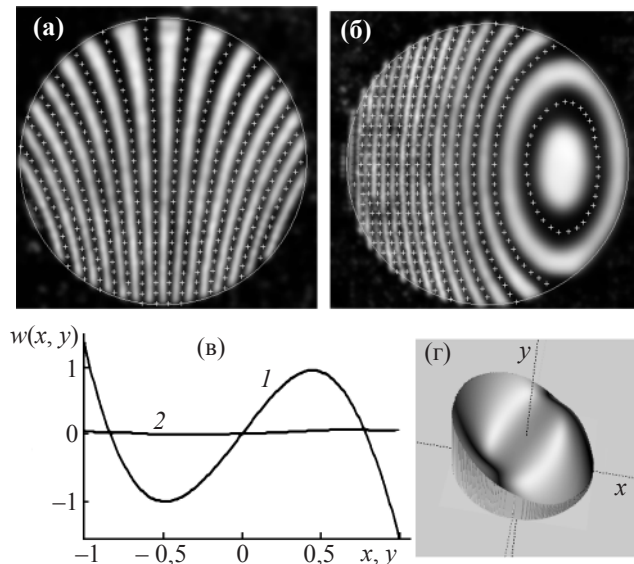
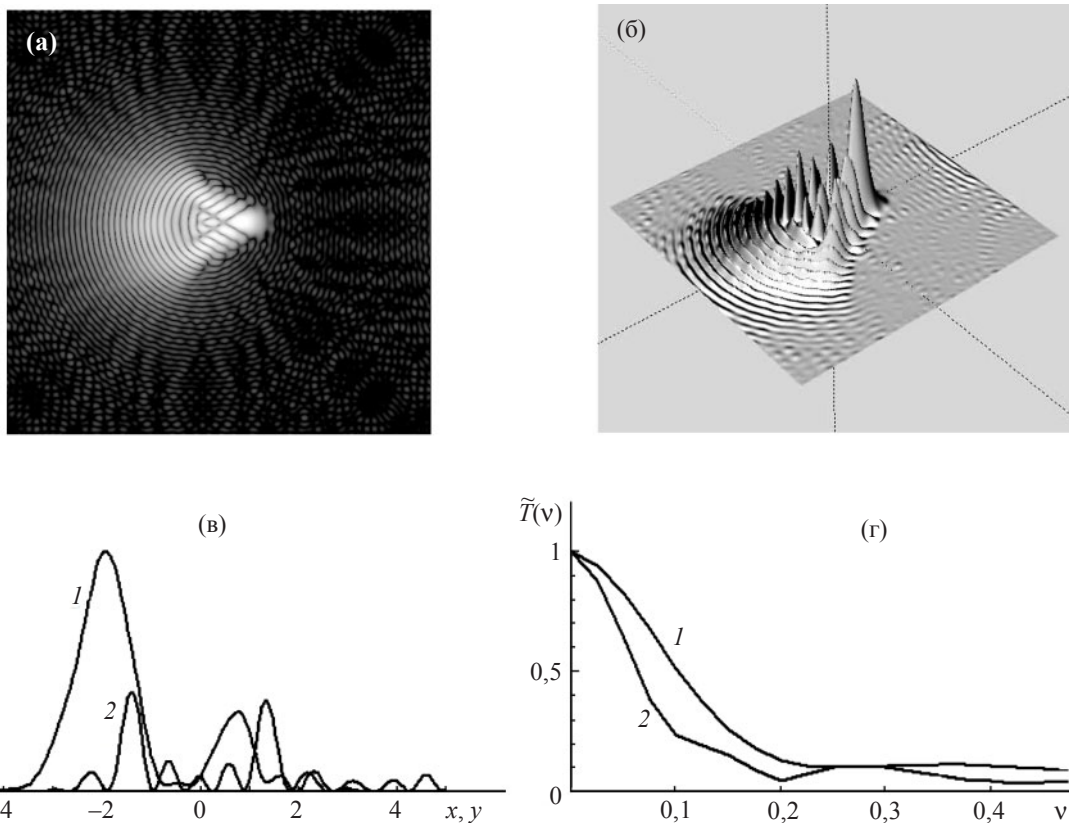


Рис. 4. Интерферограммы Ронки и их обработка в программе “Tiger”. а, б – интерферограммы при ориентации решетки по направлению  $x$  и по направлению  $y$ ; в, г – результат обработки интерферограмм Ронки после решения системы дифференциальных уравнений по направлениям  $x$  и  $y$ . Получена полная картина поверхности деформаций волнового фронта (1 – сечение по  $x$ , 2 – сечение по  $y$ ).



**Рис. 5.** Характеристики качества изображения. а, б – изображение точки и трехмерное отображение ФРТ, полученные при преобразовании функции Фурье деформаций волнового фронта, в – график функции рассеяния точки в каноническом масштабе пространственных координат  $(x, y)$ . Оцифровка оси ординат выполнена, исходя из числа Штреля (1 – сечение по  $x$ ; 2 – сечение по  $y$ ), г – ФПМ в каноническом масштабе, кривые пронумерованы по тем же пространственным координатам.

ки интерферограмм Ронки абберации комы, представленной в книге Д. Малакары “Оптический производственный контроль” [1, С. 225, рис. 9.5].

### Заключение

Данная работа ставила цель компьютеризировать интерферометр на базе схемы Ронки агрегатированием интерферометра Ронки с цифровой фотокамерой.

Выполненная работа позволила создать комплекс компьютеризированного интерферометра Ронки с новыми возможностями, такими как

- экранное отображение и общая оценка характера абберации по виду картины интерференционных полос,

- возможность регистрации интерференционных картин и компьютерной обработки для улучшения их структуры (например, уменьшение уровня шумов в изображении), что дает положительный эффект в точности исследования,

- применение компьютера создает возможность оперативной автоматической расшифровки интер-

ферограмм путем опознавания и оцифровки координат полос,

- применение компьютерной программы делает предпосылки для всесторонней обработки информации с целью дальнейшего получения характеристик качества исследуемой системы, таких как ФРТ, ФРЛ и ФПМ,

- компьютерная обработка позволяет также отобразить результаты интерферометрии Ронки в форме теневой картины исследуемой системы, что в ряде случаев улучшает условия оценки характеристик исследуемого объекта.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Малакара Д. Оптический производственный контроль. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
2. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1984. 232 с.
3. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 5. СПб.: изд. ГУ ИТМО, 2006. 104 с.
4. Ронки В. Испытание оптических систем. М.–Л.: Гос-техтеориздат, 1933. 102 с.