

КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР СДВИГА

© 2008 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

Наряду с классическими интерферометрами, построенными по принципу деления амплитуды световой волны и создания рабочего и опорного волновых фронтов, создаются интерферометры, основанные на принципе сдвига раздвоенного по амплитуде рабочего волнового фронта, известные как интерферометры сдвига. Они не требуют применения образцовых оптических деталей и нечувствительны к вибрациям. Основным недостатком традиционных интерферометров сдвига являются отсутствие наглядности и сравнительная сложность расшифровки интерференционной картины для количественной оценки погрешностей исследуемой системы. Данная работа посвящена решению упомянутой проблемы и открывает пути компьютеризированной автоматической расшифровки интерферограмм, что существенно упрощает операции расшифровки, повышает их оперативность и наглядность, позволяет определять количественные характеристики погрешностей и качества исследуемой системы. Это создает условия применения интерферометров сдвига в широкой практике.

Коды OCIS: 120.0120.

Поступила в редакцию 19.10.2007.

Введение

В последнее время наряду с классическими интерферометрами, построенными по принципу деления амплитуды световой волны, ведутся работы по созданию и применению интерферометра, построенного по принципу сдвига раздвоенного по амплитуде рабочего волнового фронта либо его деления и последующего сдвига, в том числе интерферометров сдвига. Замечательная особенность таких интерферометров заключается в том, что они не требуют применения эталонных оптических деталей, так как в них контролируемый волновой фронт накладывается на точно такой же, но сдвинутый. Сдвиг может быть боковым, поворотным, реверсивным или радиальным. Интерферометры сдвига мало чувствительны к вибрациям, так как интерферирующие лучи проходят практически один и тот же путь [1, 2]. Основными недостатками интерферометров сдвига являются меньшая наглядность и сравнительная сложность расшифровки интерференционной картины при количественной оценке погрешностей исследуемой системы, особенно при определении поверхности деформаций волнового фронта. Данная работа посвящена решению упомянутой проблемы и открывает пути расширения применений интерферометров сдвига.

Схема интерферометра сдвига

Рассмотрим принцип работы интерферометра сдвига. Пусть в исследуемую оптическую систему *б* (рис. 1), например, объектив, падает плоский вол-

новой фронт, который преобразуется в сферический волновой фронт, в общем случае искаженный аберрациями и ошибками изготовления объектива. Светоделительный кубик *7* с полупрозрачной гипотенузной гранью делит пучок лучей на два и направляет полученные пучки к плоским зеркалам *8* и *9*. Задний фокус исследуемой системы совмещен с плоскостью зеркал *8* и *9*. Пучки лучей, отраженные от зеркал *8* и *9*, возвращаются в автоколлимации на светоделительный кубик *7* и заполняют входной зрачок объектива *10*, интерферируя между собой.

Изображение зрачка исследуемого объектива *б* с заполняющей его картиной полос интерферометрии сдвига формируется объективом регистрирующей камеры *10* на поверхности матрицы *11*.

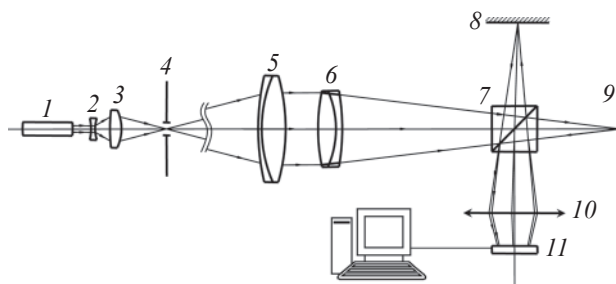


Рис. 1. Схема интерферометра бокового сдвига. 1 – лазер; 2 и 3 – осветительный объектив; 4 – точечная диафрагма, 5 – коллиматорный объектив, 6 – исследуемый объектив, 7 – светоделительный кубик; 8 и 9 – плоские автоколлимационные зеркала; 10 – объектив регистрирующей камеры, 11 – матрица регистрирующей камеры.

Картина интерференционных полос зависит как от деформаций исследуемого волнового фронта, так и от настройки интерферометра. Если зеркала 8 и 9 расположены на равных расстояниях от выходных граней кубика 7, то поворотом одного из них можно получить интерференционную картину за счет бокового сдвига волновых фронтов (рис. 1 и 3).

С помощью рассмотренной схемы можно получить смешанный (радиально-боковой) сдвиг волновых фронтов путем соответствующих перемещений и наклонов зеркал 8, 9 [1].

Таким образом, интерференционная картина, возникающая в интерферометре сдвига, является результатом взаимодействия двух одинаковых, но смещенных волновых фронтов, полученных с помощью разделительного элемента (рис. 1). В качестве разделительных элементов можно использовать также поляризационные призмы, зеркала, клинья, дифракционные решетки и другие оптические элементы.

Математическое описание интерферометра бокового сдвига

На рис. 2 показаны исходный волновой фронт и его аналог с боковым сдвигом. Будем считать исходный фронт практически сферическим, с небольшими отклонениями $W(x, y)$ (где x, y – координаты произвольной точки P) от сферы. При смещении фронта на величину s в направлении x его погрешность в точке P составит $W(x - s, y)$, а результирующая разность хода ΔW для двух фронтов определится как $W(x, y) - W(x - s, y)$. Вид интерференционной картины определяется разностью хода между двумя волновыми фронтами, т. е. функцией $\Delta W(x, y)$. Интенсивность в произвольной точке интерференционной картины выражает формула [3]

$$I(x, y) = 2I_0 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{\Delta W(x, y)}{\lambda} \right) \right], \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность каждой из световых волн, $\Delta W(x, y)$ – разность хода, λ – длина волны излучения.

Интерференционная картина представляет собой топографию этой функции. Из (1) получаем уравнение для интерференционных полос

$$\Delta W(x, y) = W(x, y) - W(x - s, y) = N\lambda, \quad (2)$$

где x, y – координаты на зрачке испытуемой системы, N – порядок полосы – целое число.

Интересно отметить, что при малых значениях s уравнение (2) можно записать в виде [1, 4]

$$\frac{\partial W}{\partial x} s = N\lambda. \quad (3)$$

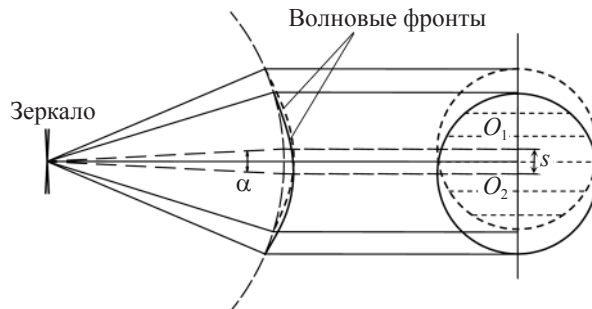


Рис. 2. Схема формирования интерференционных полос.

Следовательно, интерферометр бокового сдвига дает информацию об аберрации $\partial W / \partial x$ луча в угловых единицах. Уравнение становится более корректным при $s \rightarrow 0$, однако одновременно снижается и чувствительность; поэтому, исходя из требуемой в каждом конкретном случае точности, необходимо находить оптимальное значение s .

Пользуясь формулой (1), можно вычислить интерферограмму по заданному волновому фронту и, наоборот, по интерферограмме можно восстановить испытуемый волновой фронт (качественно и количественно оценить погрешности исследуемой оптической системы). Для этого мы разработали алгоритмы и программное обеспечение, которые позволяют моделировать интерферограмму оптической системы по конструктивным параметрам системы, отображая влияние расчетных аберраций. Программа позволяет также восстанавливать волновой фронт в ходе контроля изготовленной оптической системы.

Алгоритм моделирования интерферограммы сдвига, исходя из расчетных параметров исследуемой оптической системы

1. Ввод исходных данных, таких как: конструктивные параметры оптической системы, положение и величина предмета, диаметр и положение входного зрачка, величина сдвига s .
2. Вычисление хода совокупности лучей, заполняющих зрачок, по формуле Федера.
3. Вычисление деформации волнового фронта $W(x, y)$.
4. Описание функции деформации волнового фронта по полиному Цернике $C(x, y)$ методом наименьших квадратов.
5. Вычисление разности хода $\Delta W(x, y) = C(x, y) - C(x - s, y)$ и интенсивности в данной точке волнового фронта по формуле (1).

6. Приведение интенсивности к пиксельной яркости и отображение на экране интерференционной картины как совокупности вычисленных значений интенсивности.

На основе данного алгоритма создана программа для исследования интерферометра сдвига. На рис. 3а и 3б представлены функции деформации волнового фронта $W(x)$, разности хода лучей $\Delta W(x)$ и интерферограммы бокового сдвига объектива телескопической системы. Его параметры приведены в таблице, где r – радиусы кривизны поверхностей, d – расстояние между двумя последующими поверхностями, $D_{св}$ – световой диаметр поверхности.

На рис. 3а видно, что при небольшом сдвиге и отсутствии поперечной расфокусировки интерферо-

метра (т. е. взаимного наклона наложенных волновых фронтов) количество интерференционных полос очень мало. Следовательно, при обработке такой интерферограммы невозможно получить информацию о волновом фронте на всей площади зрачка исследуемой системы. Поэтому необходимо дополнить сдвиг небольшой поперечной расфокусировкой для того, чтобы полосы стали чаще (рис. 3б).

Здесь под расфокусировкой интерферометра понимается поперечное разведение автоколлимационных бликов, приводящее к появлению взаимного наклона двух интерферирующих волновых фронтов.

Кроме того, ввод поперечной расфокусировки позволяет устранить неопределенность при расшифровке сложных волновых фронтов, позволяя избе-

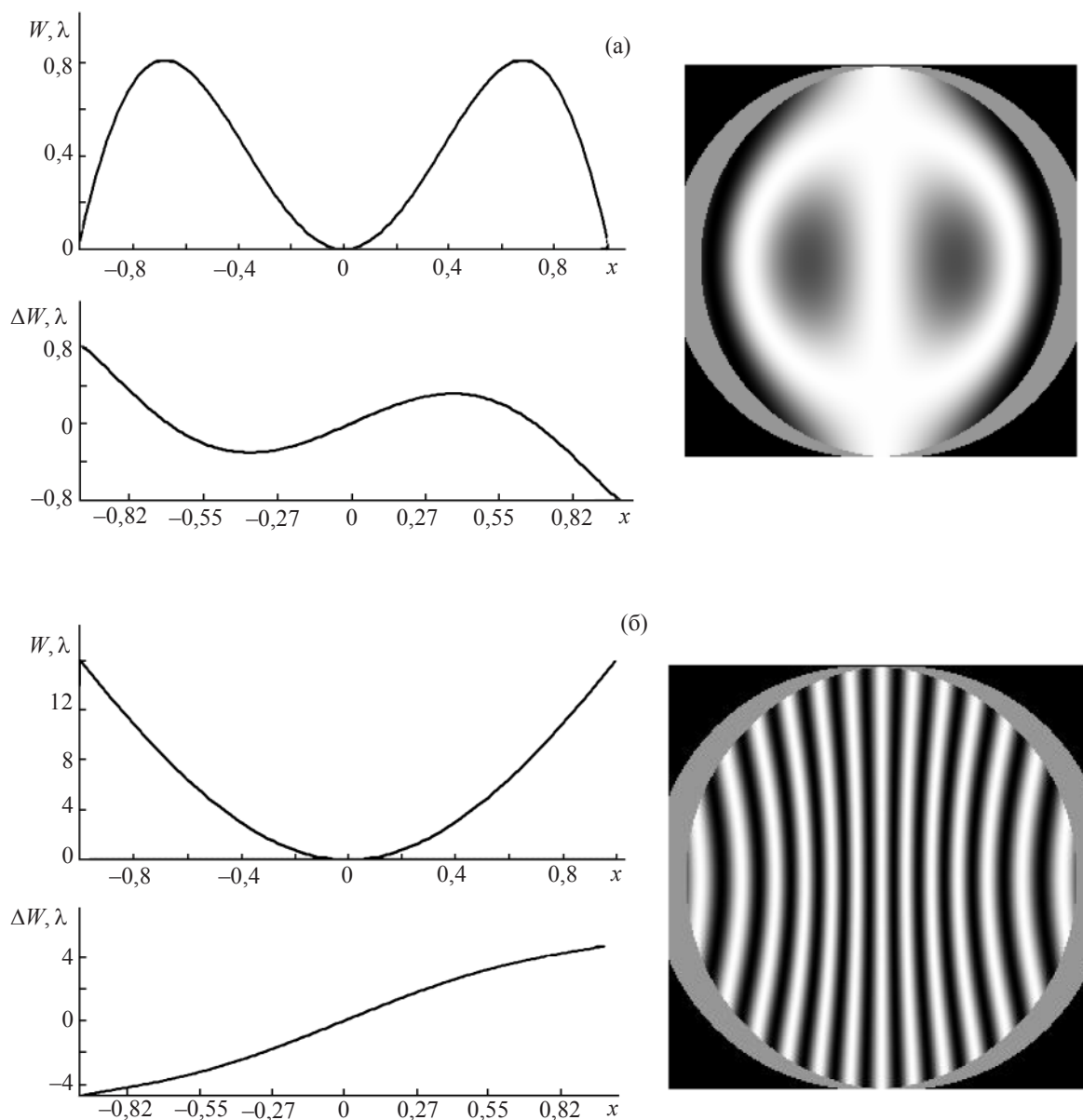


Рис. 3. Функции деформации волнового фронта, разности хода лучей и интерферограммы бокового сдвига. а – в случае только сферической аберрации без расфокусировки, $s = 0,157$ мм; б – в случае только сферической аберрации и расфокусировки 2 мм, $s = 0,157$ мм.

Конструктивные параметры исследуемого объектива

Параметры			Материал
r	d	$D_{\text{св}}$	Стекло
128,680	10,00	50	К8
-90,860	4,00	50	ТФ1
-275,720	198,28	50	

жать появления интерференционных полос замкнутой формы.

При математической обработке результатов интерферометрии введенная технологическая расфокусировка устраняется программой в процессе балансирования системы коэффициентов Цернике.

Восстановление волнового фронта при обработке интерферограммы сдвига

Задача количественной оценки погрешности оптических систем по интерферограмме сдвига сложнее, чем задача обработки классических интерферограмм Тваймана–Грина или Физо, и в полном объеме может быть решена только благодаря эффективным алгоритмам.

Как известно, для восстановления двумерной функции деформаций волнового фронта $W(x, y)$ необходимо и достаточно знать первые производные этих деформаций по двум взаимноперпендикулярным направлениям x и y . После этого функцию $W(x, y)$ находят путем решения системы дифференциальных уравнений. В этом случае две первые производные волнового фронта можно определить из двух интерферограмм при сдвиге по двум указанным направлениям.

Далее мы применим указанный принцип восстановления волнового фронта при использовании двух сдвиговых интерферограмм, полученных за счет сдвига разделенного по амплитуде волнового фронта, последовательно по двум взаимноперпендикулярным направлениям.

Из формулы (3) следует, что если сдвиг происходит поочередно по двум направлениям, перпендикулярным друг к другу (x и y), то получаются две интерферограммы с полосами, которые описываются уравнениями

$$\frac{\partial W}{\partial x} s = \lambda N, \quad \frac{\partial W}{\partial y} s = \lambda N.$$

Совокупный результат определяется системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\lambda N}{s}, \\ \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\lambda N}{s}. \end{cases} \quad (4)$$

Из системы уравнений (4) видно, что все точки, находящиеся на одной полосе, отображают первую производную волнового фронта со значением $\lambda N/s$ в заданных направлениях x и y .

Поэтому при обработке двух интерферограмм получаем совокупность точек, принадлежащих функциям $\partial W/\partial x$ и $\partial W/\partial y$. Эти функции можно описать полиномами Цернике $P_x(x, y)$ и $P_y(x, y)$ методом наименьших квадратов. В результате имеем

$$\begin{cases} \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = P_x(x, y), \\ \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = P_y(x, y). \end{cases} \quad (5)$$

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

Систему уравнений (5) можно решать численным методом Рунге–Кутты. При этом удобно выбрать начальное условие $W|_{x=0, y=0} = 0$.

После получения функции деформаций волнового фронта $W(x, y)$ в численном виде нужно пред-

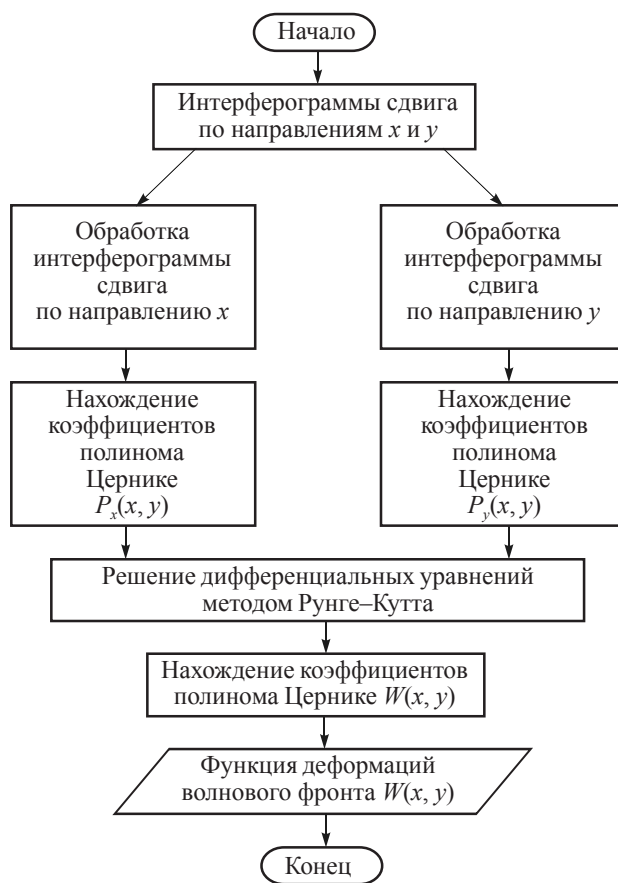


Рис. 4. Схема алгоритма обработки данных цикла измерений на интерферометре бокового сдвига.

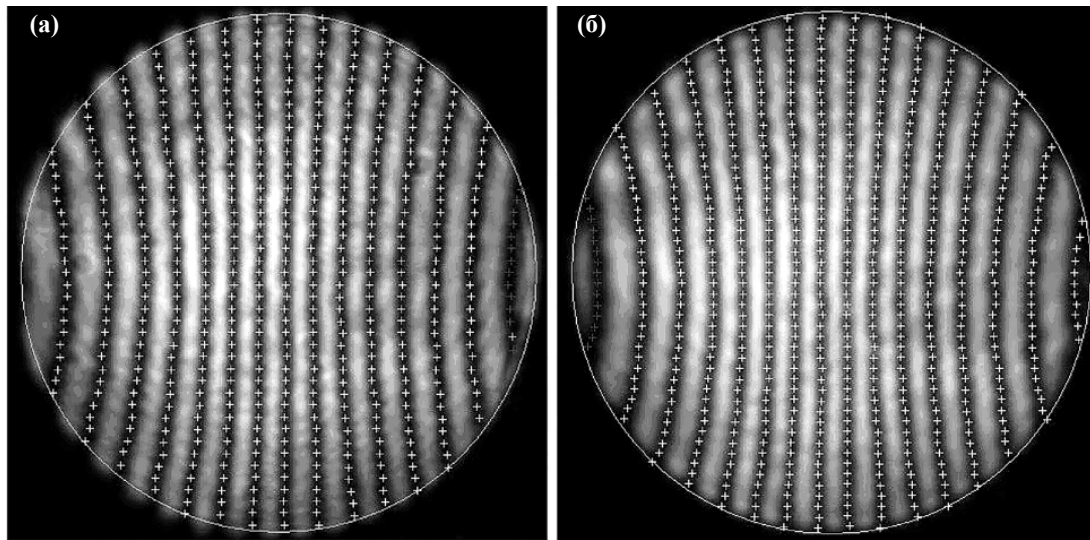


Рис. 5. Интерферогаммы сдвига и их обработка в программе “Tiger”. а – сдвиг по x , б – по y .

ставить ее с помощью полинома Цернике с коэффициентом C_{20} для устранения поперечной расфокусировки.

Итак, для получения в интерферометре сдвига функции деформации волнового фронта, сформи-

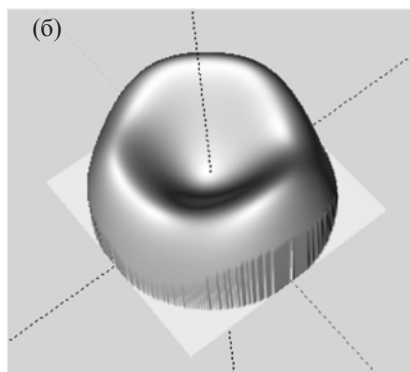
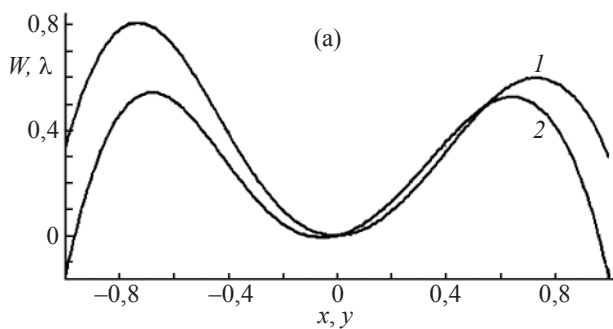


Рис. 6. а – результат обработки интерферогаммы сдвига после решения системы дифференциальных уравнений по направлениям x (1) и y (2); б – трехмерная картина поверхности деформаций волнового фронта.

рованного исследуемой системой, необходимы регистрация и одновременная обработка двух интерференционных картин, полученных при выполнении сдвига последовательно по осям x и y .

Схема алгоритма обработки интерферогамм бокового сдвига показана на рис. 4. На основе этого алгоритма в ходе данного исследования разработана программа “Tiger”, которая позволяет восстанавливать волновой фронт, обрабатывая две сдвиговые интерферогаммы, зарегистрированные при ориентации полос последовательно по двум взаимно перпендикулярным направлениям, и анализировать результаты для получения количественных характеристик качества оптических систем, например, таких как функция рассеяния точки, функция рассеяния линии или частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) [5].

Для иллюстрации и проверки работы программы рассмотрен пример обработки интерферогамм сдвига (рис. 5, 6, 7).

Исходя из распределения интенсивности в интерферогамме, программа автоматически определяет координаты совокупности точек для центральной линии каждой интерференционной полосы. Эти точки обозначаются крестиками на полосах интерферогамм (рис. 5).

Совокупность найденных координат служит для определения (путем аппроксимации с применением метода наименьших квадратов) функции поверхности деформаций исследуемого волнового фронта (рис. 6).

Дальнейшая обработка полученной функции с помощью преобразования Фурье позволяет определять характеристики качества изображения исследуемой системы (рис. 7), где $I(x, y)$ – интенсивность

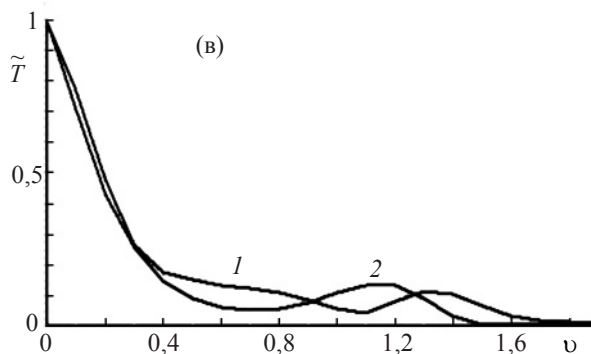
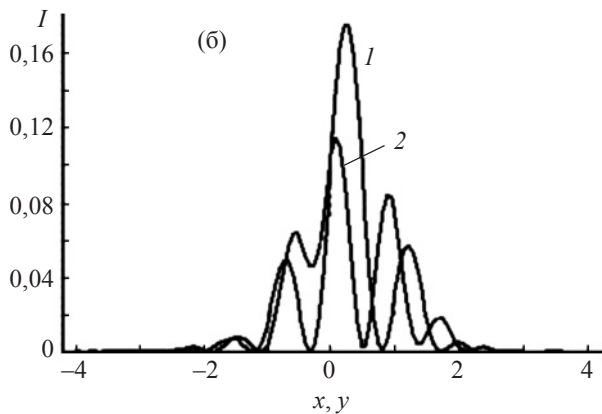
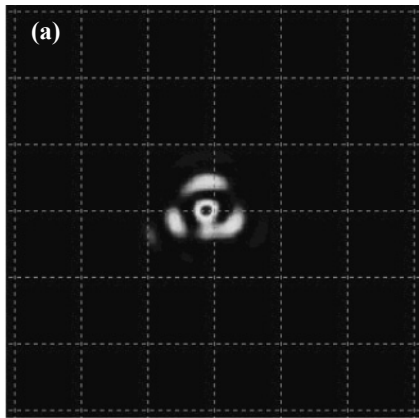


Рис. 7. а – изображение точки, б – функция рассеяния точки (оцифровка оси ординат выполнена исходя из числа Штреля), в – ЧКХ, 1 – сечение по x , 2 – по y .

в рассчитанном изображении точки, $\tilde{T}(\nu)$ – значение коэффициента передачи контраста в ЧКХ; ν – значение пространственной частоты в канонических единицах.

Выводы

В данной работе преследовалась цель компьютеризации интерферометра на базе схемы сдвига путем его оснащения цифровой камерой, подключенной к компьютеру.

Достигнутые результаты позволили создать комплекс компьютеризированного интерферометра сдвига с новыми возможностями:

1) экранным отображением и автоматической расшифровкой координат интерференционных полос с высокой надежностью и достоверностью,

2) регистрацией интерференционных картин и компьютерной обработкой их структуры, что дает повышение эффективности контроля и оперативности исследований,

3) получением информации для дальнейшего определения количественных характеристик качества исследуемой системы, таких как функций рассеяния точки и линии и ЧКХ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малакара Д. Оптический производственный контроль. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
2. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 5. СПб.: Изд-во СПб ГУ ИТМО, 2006. 104 с.
3. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985. 351 с.
4. Зверев В.А., Кривоустова Е.В. Оптотехника несферических поверхностей. СПб.: Изд-во СПб ГУ ИТМО, 2006. 202 с.
5. Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. М.: Машгиз, 1978. 220 с.