

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ИЗОФОТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА В ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ, Т. В. ТОЧИЛИНА

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия,  
E-mail: tvtochilina@itmo.ru, tvtochilina@mail.ru*

Решена задача повышения точности интерференционных измерений путем выделения линий центров интерференционных полос — изофот. Интерферограмма может быть получена, в частности, на микроинтерферометре Линника. Рассматриваются принципы изофотометрии, используемые при компьютерной обработке интерферограмм. В основе изофотометрии лежит применение приемника-анализатора изображения, выполняющего преобразование интерференционного изображения с осуществлением функции преобразования типа *comb*. Благодаря такому преобразованию достигается повышение точности интерференционных измерений в 5—10 раз.

**Ключевые слова:** микроинтерферометр Линника, точность, интерферограмма, изофотометрия, изофота

**Введение.** Повышение точности методов и средств исследования и контроля оптических систем зависит от ряда факторов, например трансформации оптико-измерительных изображений.

Статья посвящена решению задачи повышения точности интерференционных измерений путем выделения линий центров интерференционных полос.

В производстве оптических приборов применяются фотометрический и геометрический (преимущественно) способы извлечения информации из интерференционных картин [1]. Линия центра интерференционной полосы служит геометрическим местом точек, каждая из которых указывает на координату центра полосы. В настоящей работе линией центра полосы является изофота.

Используя современные средства трансформации оптико-измерительных изображений, возможно повысить в них пограничные градиенты деталей изображения. Как показали исследования [1], эти градиенты функционально связаны с точностью оптических наводок.

Будем опираться на понятие функции преобразования (ФП) [2] как характеристики чувствительности интерферометра, т.е. интерферометрического измерительного преобразователя искажений волнового фронта в схеме оптического контроля.

Повышение градиента достигается применением ФП, например типа „импульс“ [3]. Наиболее полно этот эффект проявляется при использовании функции преобразования типа „гребенка“ — *comb* [3], которая описывает распределение интенсивности в изображениях, получаемых в изофотометрии, а также в многолучевой интерферометрии. Эффективность решения позволяет применять его в оптической промышленности, оптико-физических исследованиях и учебном процессе.

**Теоретическая часть.** Функция преобразования (или характеристика чувствительности метода контроля) [3] для интерферометра является инвариантной характеристикой, описывающей структуру интерференционного изображения.

Функция распределения интенсивности в интерференционной картине для точно сфокусированного двулучевого интерферометра:

$$I(y, z) = 2a^2 \{1 + \cos[2\pi W(y', z')]/\lambda\},$$

где  $a$  — амплитуда напряженности электрического поля в точке рабочего волнового фронта;  $W(y', z')$  — волновая абберация в линейной мере;  $\lambda$  — длина волны излучения.

Обозначим  $[W(y', z')]/\lambda = \omega$ , где  $\omega$  — волновая абберация.

Введем понятие относительной интенсивности интерференционной картины:

$$\tilde{I} = I_i / I_0,$$

где  $I_i$  — интенсивность в заданной точке интерференционного изображения;  $I_0$  — интенсивность в той же точке при отсутствии абберации.

Опустив преобразования, получаем ФП типа косинусоиды:  $\tilde{I} = \cos^2 \pi \omega$ . Здесь  $\omega = W/\lambda$ , где  $W$  — отклонение волнового фронта от нормали.

После компьютерной обработки интерферограмма преобразуется в изофотограмму [1], которая состоит из системы штрихов, соответствующих линиям центров интерференционных полос. Это изображение описывается ФП comb:

$$I_{\text{ок}} = \text{comb} \left[ \frac{1}{\lambda} (y \sin \theta + kW) \right],$$

где  $I_{\text{ок}}$  — относительная интенсивность оконтуренной интерферограммы;  $\theta$  — угол заклона образцового волнового фронта интерферометра относительно рабочего волнового фронта;  $y$  — координата, ориентированная по нормали к интерференционной полосе;  $k$  — коэффициент умножения полос (для случая, когда такое умножение применяется) [4].

Периодическая ФП метода исследования поверхности comb может быть представлена выражением:

$$I_{y,z} = \text{comb}(W / \lambda_W) = \sum_{n=1}^N \delta(W - n\lambda_W),$$

где  $\lambda_W \leq W \leq n\lambda_W$ . На практике при  $W/\lambda_W = 0, 1, 2, 3, \dots$  —  $I(W) = I_{\text{max}}$ , при  $W/\lambda_W \neq 0, 1, 2, 3, \dots$  —  $I(W) = 0$ .

Анализ показал, что разработанная система ФП дает ряд положительных эффектов, таких как сокращение избыточности информации, повышение чувствительности контроля и точности измерений и др. [4].

Как показали исследования [1], в такой системе обеспечивается точность определения координат полос, которая в 5—10 раз (в зависимости от зашумленности) превышает точность для интерференционных картин, не прошедших такую обработку.

**Экспериментальная часть.** Толщина пленочных покрытий менее 1 мкм. Контактные измерения толщины таких покрытий требуют применения дорогостоящей аппаратуры, трудоемки и чреваты опасностью повреждения измеряемой поверхности. Подходящее решение — использовать интерферометр Линника [5].

Точность отсчета координаты интерференционной полосы при помощи окуляра-микрометра до обработки изображения составляет 0,1 шага полосы. Цифровая обработка изображения с выделением линий центров полос позволяет на порядок повысить точность отсчетного модуля, а значит — точность результатов измерения. Одновременно повышаются точность и оперативность настройки измерительной схемы.

Для измерения толщины пленки, нанесенной на плоскую полированную поверхность (подложку), необходимо, чтобы часть последней была свободна от пленки. Это достигается или экранированием участка подложки при нанесении пленки, или путем травления части пленки. В результате на интерференционной полосе образуется ступенька, высота которой зависит от толщины измеряемой пленки [6].

Экспериментальные исследования выполнены на базе классического микроинтерферометра Линника [7—15].

Модуль цифровой обработки позволяет получить интерференционное изображение с помощью матричной камеры, которая присоединена к окуляру микроинтерферометра. Модернизированная схема интерферометра показана на рис. 1 (1 — лампа; 2 — конденсор; 3 — апертурная диафрагма; 4 — объектив; 5 — полевая диафрагма; 6 — светоделительная пластина; 7 — фокус объектива; 8 — подложка с исследуемой пленкой; 9 — объектив наблюдательного плеча; 10 — компенсатор; 11 — объектив эталонного плеча; 12 — плоское зеркало эталонной (образцовой) плоской поверхностью; 13 — окуляр; 14 — матричная камера; 15 — модуль цифровой обработки интерференционного изображения).

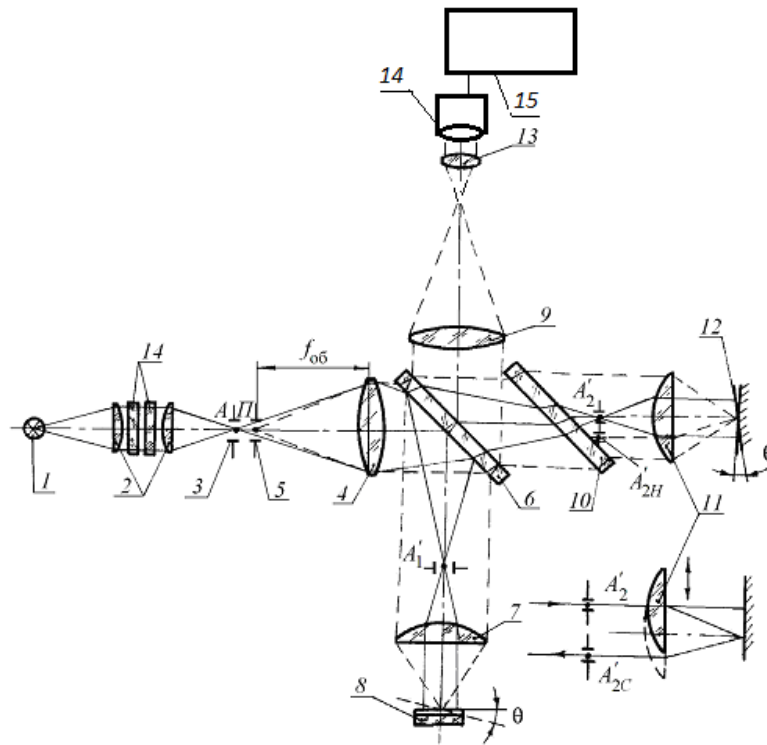


Рис. 1

На мониторе цифрового модуля отображаются интерференционное изображение (рис. 2) и изображение, прошедшее цифровую обработку с целью формирования линий центров интерференционных полос (рис. 3).

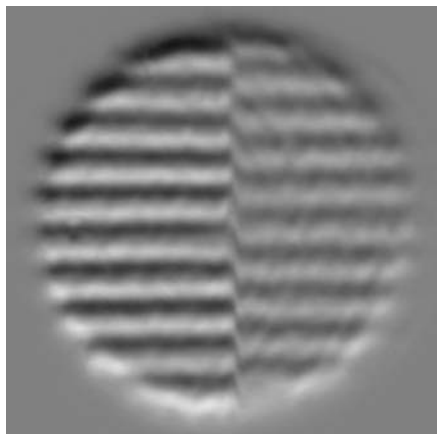


Рис. 2

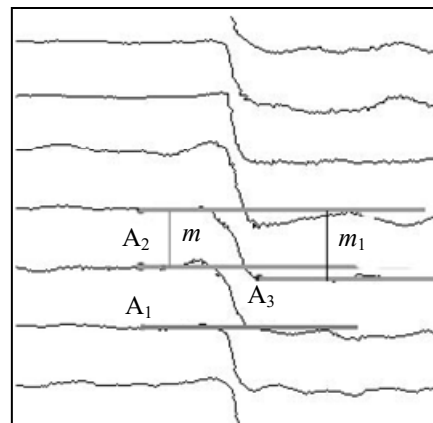


Рис. 3

Цифровая обработка изображения выполнена с использованием программы Areas для формирования системы линий центров интерференционных полос как шкалы для отсчета  $m_1$  — величины, соответствующей толщине измеряемой тонкой пленки.

**Выполнение измерений.** Алгоритм измерения полученного интерференционного изображения, прошедшего цифровую обработку (рис. 3):

1) на интерферограмме выбираются точки  $A_1$  и  $A_2$  для отсчета величины  $m$  (шага интерференционных полос) и  $A_3$  — для отсчета высоты ступеньки, соответствующей толщине исследуемой пленки;

2) снимается отсчет  $m_1$  в долях шага интерференционной полосы для определения смещения двух систем полос, соответствующего толщине измеряемой пленки  $h_n$ .

В результате получена пленка толщиной 1,2 шага полосы, т.е.  $1,2\lambda$ , где  $\lambda=550$  нм (в автоколлимации цена шага интерференционной полосы соответствует  $1\lambda$ ):  $h_n=550 \cdot 1,2=660$  нм.

**Заключение.** По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1) обеспечено повышение точности методов и средств исследования и контроля оптических систем;

2) созданы возможности повышения точности на основе использования современных средств трансформации оптико-измерительных изображений;

3) повышена точность интерференционных измерений путем выделения линий центров интерференционных полос;

4) показано, что линией центра полосы является изофота. Ее структура описывается с применением функции преобразования типа  $\cos b$ ;

5) найдена возможность повысить в изображении пограничные градиенты деталей изображения, функционально связанные с точностью оптических наводок;

6) показана инвариантность данного способа преобразования оптических измерительных изображений применительно к интерферометрии и изофотометрии;

7) выполненные экспериментальные исследования подтвердили верность теоретического рассмотрения и актуальность работы в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова Т. А., Кирилловский В. К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1984. 231 с.
2. Порфирьев Л. Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. Л.: Машиностроение, 1989. С. 31.
3. Кирилловский В. К., Анитропова И. Л., Иванова Т. А. Синтез комплекса методов и унифицированных приборов оптического контроля. Л.: ЛИТМО, 1988. С. 32.
4. Гаврилов Е. В., Кирилловский В. К. Современные кинообъективы и их контроль // Оптич. журн. 2005. Т. 72, № 10. С. 47—56.
5. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Ч. 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. СПб: Университет ИТМО, 2017. 65 с.
6. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения. СПб: Лань, 2010. 304 с.
7. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Ч. 5. Аберрации и качество изображения. СПб: Университет ИТМО, 2019. С. 35.
8. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Учеб. пос. по лабораторному практикуму. СПб: Университет ИТМО, 2014. 130 с.
9. Коломийцев Ю. В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 295 с.
10. Губайдуллин К. Р., Кирилловский В. К. Повышение точности микроинтерферометра Линника // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 4. С. 381—385.
11. Егоров В. А. Оптические и шуповые приборы для измерения шероховатости поверхности. М.: Машиностроение, 1965. 223 с.

12. Бавыкин О. Б., Вячеславова О. Ф. Взаимосвязь свойств поверхности и ее фрактальной размерности // Известия МГТУ „МАМИ“. 2013. Т. 2, № 1(15). С. 14—18.
13. Микроинтерферометр // Большая советская энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия. 1969—1978. <https://slovar.cc/enc/bse/2017912.html>.
14. Пат. RU2000110796А. Оптический интерферометр / А. А. Олейников. 2001.
15. Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. М.: Машиностроение. 2005. 655 с.

#### Сведения об авторах

- Владимир Константинович Кирилловский** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет прикладной оптики; E-mail: vkkir@mail.ru
- Татьяна Вячеславовна Точилина** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет прикладной оптики; старший преподаватель; E-mail: tvtochilina@itmo.ru

Поступила в редакцию  
28.10.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Применение компьютерного изофотометрического метода в интерферометрии // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 2. С. 137—142.

## APPLICATION OF COMPUTER ISOPHOTOMETRIC METHOD IN INTERFEROMETRY

V. K. Kirillovsky, T. V. Tochilina

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: tvtochilina@itmo.ru, tvtochilina@mail.ru

The problem of increasing the accuracy of interference measurements is solved by selecting the lines of the centers of interference bands – isophots. The interferogram can be obtained, for example, using a Linnik micro-interferometer. The principles of isophotometry used in computer processing of interferograms are considered. Isophotometry is based on the use of an image receiver – analyzer that performs interference image conversion with the implementation of the comb-type conversion function. Due to the use of this transformation, an increase in the accuracy of interference measurements by a factor of 5–10 is achieved.

**Keywords:** Linnik microinterferometer, accuracy, interferogram, isophotometry, isophota

### REFERENCES

1. Ivanova T.A., Kirillovskiy V.K. *Proyektirovaniye i kontrol' optiki mikroskopov* (Design and Control of Microscope Optics), Leningrad, 1984, 231 p. (in Russ.)
2. Porfir'yev L.F. *Osnovy teorii preobrazovaniya signalov v optiko-elektronnykh sistemakh* (Fundamentals of the Theory of Signal Conversion in Optoelectronic Systems), Leningrad, 1989, pp. 31. (in Russ.)
3. Kirillovskiy V.K., Anitropova I.L., Ivanova T.A. *Sintez kompleksa metodov i unifitsirovannykh priborov opticheskogo kontrolya* (Synthesis of a Set of Methods and Unified Optical Control Devices) Leningrad, 1988, pp. 32. (in Russ.)
4. Gavrilov E.V., Kirillovskii V.K. *Journal of Optical Technology*, 2005, no. 10(72), pp. 773–780.
5. Kirillovskiy V.K., Tochilina T.V. *Opticheskie izmereniya. Chast'2* (Optical Measurements. Part 2), St. Petersburg, 2017, 65 p. (in Russ.)
6. Kirillovskiy V.K. *Sovremennye opticheskie issledovaniya i izmereniya* (Modern Optical Studies and Measurements), St. Petersburg, 2010, 304 p. (in Russ.)
7. Kirillovskiy V.K., Tochilina T.V. *Opticheskie izmereniya. Chast' 5* (Optical Measurements. Part 5), St. Petersburg, 2019, 35 p. (in Russ.)
8. Kirillovskiy V.K., Tochilina T.V. *Opticheskie izmereniya. Uchebnoe posobie po laboratornomu praktikumu* (Optical Measurements. Study Guide for Laboratory Practical Work), St. Petersburg, 2014. (in Russ.)
9. Kolomiytsev Yu.V. *Interferometry* (Interferometers), Leningrad, 1976, 296 p. (in Russ.)
10. Gubaydullin K.R., Kirillovskiy V.K. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 4(60), pp. 381–385. (in Russ.)
11. Egorov V.A. *Opticheskie i shchupovye pribory dlya izmereniya sherokhovatosti poverkhnosti* (Optical and Probe Instruments for Measuring Surface Roughness), Moscow, 1965. (in Russ.)
12. Bavykin O.B., Vyacheslavova O.F. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2013, no. 1(2), pp. 14–18. (in Russ.)

13. <https://slovar.cc/enc/bse/2017912.html>. (in Russ.)
14. Patent RU2000110796A, *Opticheskiy interferometer* (Optical Interferometer), A.A. Oleynikov. 2001. (in Russ.)
15. Klyuyev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. et al. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika* (Non-Destructive Testing and Diagnostics), Moscow, 2005, 655 p. (in Russ.)

**Data on authors****Vladimir K. Kirillovsky**— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Applied Optics;  
E-mail: vkkir@mail.ru**Tatiana V. Tochilina**— PhD; ITMO University, Faculty of Applied Optics; Senior Lecturer;  
E-mail: tvtochilina@itmo.ru

**For citation:** Kirillovsky V. K., Tochilina T. V. Application of computer isophotometric method in interferometry. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 2. P. 137—142 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-2-137-142