

ИНВАРИАНТНОСТЬ ПРИНЦИПОВ ИЗОФОТОМЕТРИИ В КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ

В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ, Т. В. ТОЧИЛИНА

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

Решена задача повышения точности измерений путем изофотометрической обработки интерферограммы. Выявлена инвариантность принципов изофотометрии в компьютерном моделировании интерферограммы. Инвариантность обеспечивается аппаратом функций преобразования, в частности приемником-анализатором изображения, изменяющим изображение с преобразованием типа *comb*. Это решение может быть использовано при обработке любых интерферограмм с целью повышения точности измерения координат интерференционных полос.

Ключевые слова: *интерферограмма, изофотометрия, инвариантность, компьютерное моделирование, интерферометр*

Введение. Фундаментальными методами контроля качества оптической поверхности являются теневой метод Фуко, метод Гартмана и интерференционный метод.

Исследователи используют эти методы из-за их наглядности и возможности анализа поверхности разной формы и размеров. При применении основ теневого метода возможна количественная оценка не только волновых фронтов, но и скорости света, а также поверхностей при изготовлении зеркал оптического телескопа [1]. В работах [2—4] рассмотрено использование датчиков волнового фронта для контроля формы оптических деталей с погрешностью результата измерений, не превышающей $0,1\lambda$. Наиболее востребован интерференционный метод, обладающий и наглядностью, и возможностью количественной оценки расшифровки интерференционной картины. С помощью этого метода возможно контролировать сферические поверхности большого диаметра и асферические зеркала, имеющие погрешность измерения в пределах $0,02—0,07\lambda$ [5].

Современные классические интерферометры Тваймана и Физо или дифракционный интерферометр Линника [6, 7] позволяют получить погрешность измерений не выше $0,05\lambda$, но для этого необходимо устранить остаточные аберрации, связанные с погрешностями формы образцовой оптической поверхности [8]. Необходимость дальнейшего повышения точности результата измерений обусловлена тем, что с каждым днем изменяются требования к качеству и условиям эксплуатации поверхностей, возрастает сложность контролируемых оптических систем: космических телескопов, современных исследовательских телескопов, аппаратуры микроэлектроники, оптико-электронных устройств записи информации. В связи с этим требуются новые методики исследования качества оптических приборов.

Цель настоящей работы — повышение точности измерений на основе изофотометрической обработки интерферограммы. При этом выявляется инвариантность [9] принципов изофотометрии в компьютерном моделировании интерферограммы. Инвариантность обеспечивает аппарат функций преобразования (ФП) [7, 10], в частности применение приемника-анализатора изображения, выполняющего преобразование изображения с ФП типа *comb* (гребенка) [10].

Использование современных средств трансформации оптико-измерительных изображений позволяет повысить пограничные градиенты деталей изображения [7, 8]. Возможность

повышения градиента достигается применением ФП типа *comb* [10], которая описывает распределение интенсивности как в изображениях, получаемых методами изофотометрии и многолучевой интерферометрии. Таким образом, обеспечивается инвариантность этого способа преобразования для формирования оптических измерительных изображений. Благодаря использованию инвариантности принципов изофотометрии в компьютерном моделировании формирования интерферограммы точность измерений повышается в 5—7 раз по сравнению с современными классическими методами интерференционных измерений [7, 8].

Новизна этого направления работ состоит в том, что впервые предложено [8, 11] понятие ФП [11] для описания процесса трансформации оптического измерительного изображения (например, интерферограммы) с преобразованием системы нерезких полос в систему четких контуров. Данное преобразование влияет на оптические измерительные наводки на полосу и обеспечивает повышение точности измерений. Использование такого решения целесообразно в оптической промышленности, а также в исследовательской деятельности и учебном процессе.

Теоретические основы. Исходная интерферограмма описывается при помощи ФП типа косинусоиды [6, 7]:

$$\tilde{I} = \cos^2 \pi \omega,$$

где $\tilde{I} = I_i / I_0$, I_i — значение интенсивности интерференционного изображения в данной точке, I_0 — интенсивность в той же точке при отсутствии аберрации; $\omega = W/\lambda$, W — нормальное отклонение волнового фронта, λ — длина волны излучения в интерферометре.

Компьютерная обработка интерферограммы дает другое изображение — изофотограмму [7, 8], которая состоит из системы штрихов, соответствующих линиям центров интерференционных полос.

Это изображение описывается ФП типа *comb*:

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

где $I_{\text{ок}}$ — относительная интенсивность в оконтуренной интерферограмме; θ — угол наклона образцового волнового фронта интерферометра относительно рабочего волнового фронта; y — поперечная координата в интерферограмме, ориентированная по нормали к направлению интерференционной полосы; k — коэффициент умножения полос (для случая, когда такое умножение применяется) [12].

Периодическая ФП метода исследования поверхности типа *comb* может быть наглядно представлена выражением:

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

где $\lambda_w \leq W \leq n\lambda_w$, или на практике:

$$I(W) = I_{\text{max}} \text{ при } W/\lambda_w = 0, 1, 2, 3, \dots; I(W) = 0 \text{ при } W/\lambda_w \neq 0, 1, 2, 3, \dots$$

Исследования [7, 8] показали, что в этом случае обеспечивается высокая точность результата измерения при определении зависимости координат полос от зашумленности.

Инвариантность интерферометрии с изофотометрией функции рассеяния точки. Понятие инвариантности позволяет применить принцип формирования изофотограммы [7, 13] к механизму формирования изображения системы центров интерференционных полос [6, 7]. Такая инвариантность чрезвычайно эффективна как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Примером использования обобщающего понятия инвариантности служит количественный теневой метод [14], где изофотограмма теневой картины Фуко после компьютерной обработки работает как интерферограмма сдвига (первая производная от профиля деформаций волнового фронта). В дальнейшем распознаются координаты полос изофотограммы теневой

картины, создается массив данных для получения карты деформаций волнового фронта (волновых aberrаций), рассчитываются функция рассеяния точки (ФРТ), функция рассеяния линии, функция концентрации энергии и частотно-контрастная характеристика, а также синтезируются 3D-изображения этих функций, т.е. картин деформаций волнового фронта и ФРТ, а также отображения распределения освещенности в дифракционном изображении светящейся точки („звезды“).

Экспериментальная часть. Точность измерения координат полосы связана с пограничным градиентом.

Погрешности измерения формы искажений исследуемого волнового фронта при интерферометрических исследованиях определяются погрешностями измерения координат положения интерференционных полос, которые, в свою очередь, зависят от градиента интенсивности на краю полосы. Данные о среднеквадратических погрешностях наводки на край изображения при различных значениях градиента позволили выявить взаимосвязи этих величин. Исследования выполнялись с применением программы Areas, достоинство которой состоит в том, что точность расшифровки повышается, когда интерференционные полосы преобразуются в тонкие линии, контрастные к фону. По оценке авторов [7, 8], погрешность измерения координат не превышает 0,05—0,1 ширины интерференционной полосы.

На рис. 1 приведена исходная интерферограмма, полученная в программе Симулятор из комплекса программного обеспечения ZEBRA.

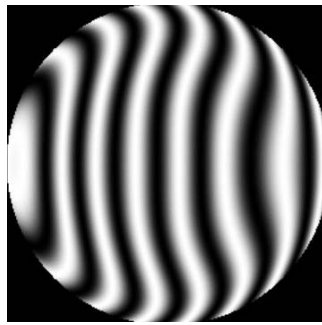


Рис. 1

Интерферограмма может быть получена на любом интерферометре, в том числе оснащенном матричной камерой. Пиксельное разрешение приемника-анализатора изображения должно быть не ниже порога разрешения, необходимого для достижения требуемой точности измерения оптических измерительных наводок. С этим разрешением согласуется ширина импульса при преобразовании исходного нерезкого изображения в систему четких штрихов, которая описывается ФП типа comb.

На рис. 2 представлены интерферограмма, полученная с помощью аппарата ФП (а), и интерферограммы колец, полученные при обработке с помощью программы Areas: после (б) и до оконтуривания (в).

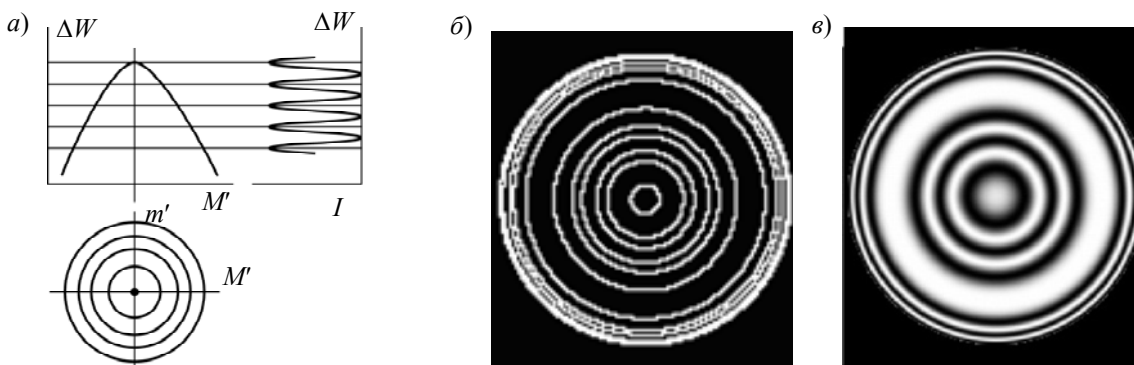


Рис. 2

Далее рассматривается инвариантность принципов изофотометрии в компьютерном моделировании интерферограммы, благодаря которой достигается погрешность интерференционных результатов измерений не превышает $0,005\lambda$. Инвариантность обеспечивает аппарат ФП, в частности, приемник-анализатор изображения, преобразующий изображение с ФП типа *comb*.

Следующий этап обработки интерферограммы проходит в режиме поперечной расфокусировки, при котором волновой фронт преобразуется в систему полос, соответствующих системе изображений поверхности исследуемого волнового фронта (рис. 3, l — стрелка прогиба интерференционной полосы; m' — шаг интерференционной полосы, соответствующий длине волны). При настройке интерферометра вносится наклон [6, 7] образцового и рабочего волновых фронтов на угол θ и частоту ν .

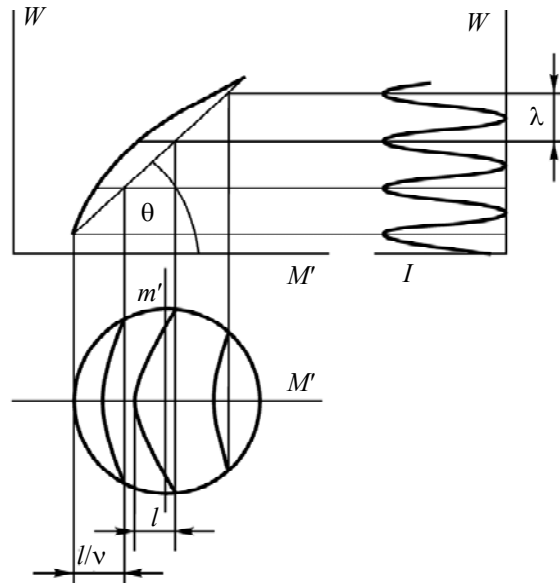


Рис. 3

Итоговая интерферограмма (после выделения линий центров белых полос) получена в программе Симулятор из комплекса ПО ZEBRA (рис. 4).

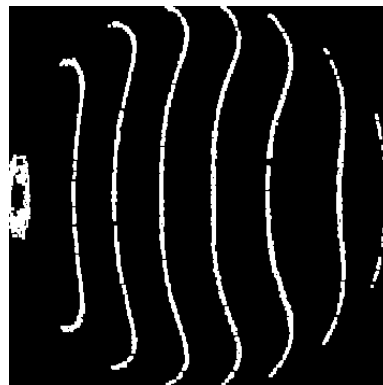


Рис. 4

Для окончания этапа может быть использован аппаратный метод измерения координат полос с их компьютерной обработкой.

Заключение. Рассмотрена инвариантность принципов изофотометрии в компьютерном моделировании интерферограммы. Выявлена инвариантность, основанная на использовании аппарата функции преобразования, в частности приемника-анализатора изображения, выполняющего преобразование изображения с преобразованием типа *comb*. Применение программы Ageas позволило преобразовать интерферограмму в систему линий центров полос. Результаты исследований позволяют обеспечить точность измерения координат полос, в 5—7 раз (в зависимости от зашумленности) превышающую точность для исходных интерференционных

картин, что соответствует значению погрешности измерений при обработке интерферограмм $0,005\lambda$. Показана возможность эффективного использования этого решения в оптической промышленности, в исследовательской деятельности и учебном процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bredikhin V. I., Kuznetsov S. P.* Measurements of wave front distortions of optical radiation using a shadow method // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5449. P. 98—102.
2. *Потанин С. А.* Датчик Шака–Гартмана для контроля качества оптики 2.5-м телескопа ГАИШ МГУ // *Астрономический журнал*. 2009. Т. 86, № 8. С. 703—709.
3. *Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Сахаров А. А.* Система контроля формы оптических деталей с использованием датчиков волнового фронта // *Лазеры в науке, технике, медицине*. 2014. С. 64—69.
4. *Sheldakova J., Kudryashov A., Zavalova V., Romanov P.* Shack-Hartmann wavefront sensor versus Fizeau interferometer for laser beam measurements // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7194. P. 71940B-1—8.
5. *Пуряев Д. Т., Лазарева Н. Л., Дуденкова Е. А.* Оптическая система интерферометра для измерения и контроля формы выпуклых сферических поверхностей большого диаметра // *Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электронное издание*. 2013. С. 1—9.
6. *Кирилловский В. К., Точилина Т. В.* Оптические измерения. Ч. 5. Аберрации и качество оптического изображения. СПб: Университет ИТМО, 2019. С. 34.
7. *Кирилловский В. К.* Современные оптические исследования и измерения. СПб: Лань, 2021. 340 с.
8. *Иванова Т. А., Кирилловский В. К.* Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1984. 231 с.
9. *Сухопаров С. А., Тимошук И. Н.* Инвариантные преобразования в оптике // *Науч.-техн. вестн. СПб ГИТМО (ТУ)*. Вып. 5. Оптические приборы, системы и технологии. 2002. С. 8—13.
10. *Порфирьев Л. Ф.* Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. Л.: Машиностроение, 1989. С. 31.
11. *Кирилловский В. К., Анитропова И. Л., Иванова Т. А.* Синтез комплекса методов и унифицированных приборов оптического контроля. Л.: ЛИТМО, 1988. С. 32.
12. *Гаврилов Е. В., Кирилловский В. К.* Современные кинообъективы и их контроль // *Оптический журнал*. 2005. Т. 72, № 10. С. 47—56.
13. *Кирилловский В. К., Точилина Т. В.* Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества изображения и измерение его характеристик. СПб: Университет ИТМО, 2018. 50 с.
14. *Зацепина М. Е., Кирилловский В. К.* Реализация современного количественного теневого метода // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2014. Т. 57, № 3. С. 68—73.

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, доцент; Университет ИТМО, факультет прикладной оптики; E-mail: tvtochilina@itmo.ru

Поступила в редакцию
21.02.2021 г.

Ссылка для цитирования: *Кирилловский В. К., Точилина Т. В.* Инвариантность принципов изофотометрии в компьютерном моделировании интерферограммы // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 4. С. 288—293.

**INVARIANCE OF THE ISOPHOTOMETRY PRINCIPLES
IN COMPUTER SIMULATION OF INTERFEROGRAM****V. K. Kirillovsky, T. V. Tochilina**

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: tvtochilina@itmo.ru

The problem of increasing the accuracy of interferometric measurements is solved on the base of isophotometric processing of the interferogram. Invariance of the isophotometry principles in computer modeling of the interferogram is revealed. The invariance is provided by the apparatus of transformation functions, in particular by the receiver-image analyzer, which changes the image with the transformation of the comb type. This solution can be used when processing any interferograms to improve the accuracy of measuring the interference fringes coordinates.

Keywords: interferogram, isophotometry, invariance, computer simulation, interferometer

REFERENCES

1. Bredikhin V.I., Kuznetsov S.P. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5449, pp. 98–102.
2. Potanin S.A. *Astronomy Reports*, 2009, no. 8(53), pp. 703–709.
3. Denisov D.G., Karasik V.E., Sakharov A.A. *Lazery v nauke, tekhnike, meditsine*, 2014, pp. 64–69. (in Russ.)
4. Sheldakova J., Kudryashov A., Zavalova V., Romanov P. *Proc. SPIE*, 2009, vol. 7194, pp. 71940B-1–8.
5. Puryayev D.T., Lazareva N.L., Dudenkova E.A. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2013, pp. 1–9. (in Russ.)
6. Kirillovskiy V.K., Tochilina T.V. *Opticheskie izmereniya. Chast' 5* (Optical Measurements. Part 5), St. Petersburg, 2019, pp. 34. (in Russ.)
7. Kirillovskiy V.K. *Sovremennye opticheskie issledovaniya i izmereniya* (Modern Optical Studies and Measurements), St. Petersburg, 2010, 304 p. (in Russ.)
8. Ivanova T.A., Kirillovskiy V.K. *Proyektirovaniye i kontrol' optiki mikroskopov* (Design and Control of Microscope Optics), Leningrad, 1984, 231 p. (in Russ.)
9. Sukhoparov S.A., Timoshchuk I.N. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2002, pp. 8–13. (in Russ.)
10. 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.)
11. Kirillovskiy V.K., Anitropova I.L., Ivanova T.A. *Sintez kompleksa metodov i unifikirovannykh priborov opticheskogo kontrolya* (Synthesis of a Set of Methods and Unified Optical Control Devices) Leningrad, 1988, pp. 32. (in Russ.)
12. Gavrilo E.V., Kirillovskiy V.K. *Journal of Optical Technology*, 2005, no. 10(72), pp. 773–780.
13. Kirillovskiy V.K., Tochilina T.V. *Opticheskie izmereniya. Chast' 4* (Optical Measurements. Part 4), St. Petersburg, 2018, 50 p. (in Russ.)
14. Zatsepina M.E., Kirillovskiy V.K. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 3(57), pp. 68–73. (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, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Applied Optics; E-mail: tvtochilina@itmo.ru

For citation: Kirillovsky V. K., Tochilina T. V. Invariance of the isophotometry principles in computer simulation of interferogram. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 4. P. 288–293 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-4-288-293