

РАЗЛОЖЕНИЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ДИСТОРСИИ ПО ОРТОГОНАЛЬНЫМ ПОЛИНОМАМ ЦЕРНИКЕ

© 2012 г. К. В. Ежова, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: ezhovakv@aco.ifmo.ru

Предложены модель фотограмметрической дисторсии и математический аппарат ее определения по измеренным величинам поперечных aberrаций. Приведено описание рассмотренной дисторсии с помощью ортогональных полиномов Цернике.

Ключевые слова: фотограмметрическая дисторсия, полиномы Цернике, поперечные aberrации.

Коды OCIS: 080.0080, 220.0220, 110.0110.

Поступила в редакцию 16.11.2011.

Введение

В последние годы в результате усложнения технологий производства, использующего принципы фотолитографии, ужесточились требования к качеству оптических систем проекционных объективов, которые применяются при производстве больших по площади схем соединений, используемых в устройствах современной электроники. Особенностью систем такого класса являются требования по обеспечению высокоточного преобразования не только тонкой структуры объекта, но и всей его геометрии. Такие системы должны быть скорректированы на минимизацию зональных aberrаций для отдельных точек поля зрения, обладать минимальными aberrациями по всему полю зрения и высоким уровнем коррекции полевых aberrаций, в том числе дисторсии. Очевидно, что все это повышает требования к качеству сборки и юстировки подобных устройств [1].

Исследование и анализ дисторсии в зависимости от параметров оптической системы при наличии ошибок изготовления и сборки обусловлены тем, что дисторсия является хорошим индикатором наличия не симметричных ошибок в оптической системе. В статье рассматривается моделирование фотограмметрической дисторсии, т. е. дисторсии, которая не содержит ошибки увеличения [2]. Такая дисторсия представляет большой интерес на эта-

пах сборки и юстировки оптических систем, поскольку позволяет на основе измерения ее величины сделать вывод о качестве оптической системы и определить ошибки ее сборки.

Использование полиномов Цернике для анализа фотограмметрической дисторсии

При первичной обработке данных измерения поперечных aberrаций обычно производится операция центрирования измеренных координат изображений центров марок, нанесенных на тест-объект, x'_i и y'_i , и координат самих центров марок на тест-объекте x_i и y_i , в соответствии с выражениями (1–4)

$$x'_{0i} = x'_i - \sum_{j=1}^N x'_j / N, \quad (1)$$

$$y'_{0i} = y'_i - \sum_{j=1}^N y'_j / N, \quad (2)$$

$$x_{0i} = x_i - \sum_{j=1}^N x_j / N, \quad (3)$$

$$y_{0i} = y_i - \sum_{j=1}^N y_j / N. \quad (4)$$

Далее по формулам (5) и (6) можно определить значения дисторсии

$$\Delta x'_i = (NA' / \lambda) (x'_{0i} - V_0 x_{0i}), \quad (5)$$

$$\Delta y'_i = (NA'/\lambda)(y'_{0i} - V_0 y_{0i}). \quad (6)$$

Таким образом, получаются составляющие дисторсии по выбранным при измерении двум координатным осям. Однако эти составляющие суммируют в себе расчетную дисторсию, дисторсию, вызванную разными типами погрешностей изготовления и сборки деталей объектива и погрешности измерений, что не позволяет их использовать непосредственно для аттестации и юстировки.

Полученные после измерений составляющие дисторсии можно рассматривать в качестве поперечных aberrаций [3], т. е. в качестве частных производных волновой aberrации, как представлено в выражениях

$$\Delta x' = (-\lambda/NA)(\partial W/\partial \rho_x), \quad (7)$$

$$\Delta y' = (-\lambda/NA)(\partial W/\partial \rho_y). \quad (8)$$

Для математического моделирования фотограмметрической дисторсии, возникающей в результате децентрировок при сборке оптических систем, возможно применение математического моделирования такой дисторсии с помощью косинусных и синусных ортогональных полиномов Цернике, которые и формируют разложение фотограмметрической дисторсии.

Моделирование фотограмметрической дисторсии

Для учета влияния дисторсии на изображение необходимо установить в поле зрения задающего коллиматора симметричную квадратную сетку с определенным, заранее заданным, числом ячеек. В этом случае при отсутствии дисторсии получаем изображение, аналогичное полю зрения, если дисторсия присутствует,

то сетка искажается (рис. 1). По характеру и численным параметрам искажения можно определить, какими коэффициентами вызвана дисторсия. Для разработки методов определения искомых коэффициентов первичного разложения дисторсии необходимо решить обратную задачу – создать искажение сетки путем смещения ее вершин от их номинального положения в поле зрения.

Для каждой точки поля зрения в каждом сечении сформирован общий вектор полиномов, где отдельно записывается вектор (9) косинусных и вектор (10) синусных полиномов Цернике

$$\mathbf{P}_{Ci} = (P_{Ci_{00}}, \dots, P_{Ci_{mn}}), \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{Si} = (P_{Si_{11}}, \dots, P_{Si_{mn}}). \quad (10)$$

Поле зрения в таком случае описывается матрицей полиномов

$$\begin{pmatrix} P_0(\sigma_{x_1}, \sigma_{y_1}) & P_1(\sigma_{x_1}, \sigma_{y_1}) & \dots \\ P_0(\sigma_{x_2}, \sigma_{y_2}) & P_1(\sigma_{x_2}, \sigma_{y_2}) & \dots \\ P_0(\sigma_{x_3}, \sigma_{y_3}) & P_1(\sigma_{x_3}, \sigma_{y_3}) & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}, \quad (11)$$

по столбцам которой располагаются косинусные и синусные полиномы, по строкам – точки.

При перемножении матрицы полиномов на вектор заданных заранее коэффициентов полиномов Цернике получаем смещение каждой точки поля, относительно номинального положения. Для наглядности задаем коэффициент масштабирования k_{SC} . Исходя из параметров анализируемой оптической системы фотолитографического объектива, принимаем рабочую длину волны $\lambda = 365$ нм, значение числовой апертуры $NA = 0,6$. В результате получаем вектор, описывающий искажение квадратной сетки, вписанной в окружность, которая пред-

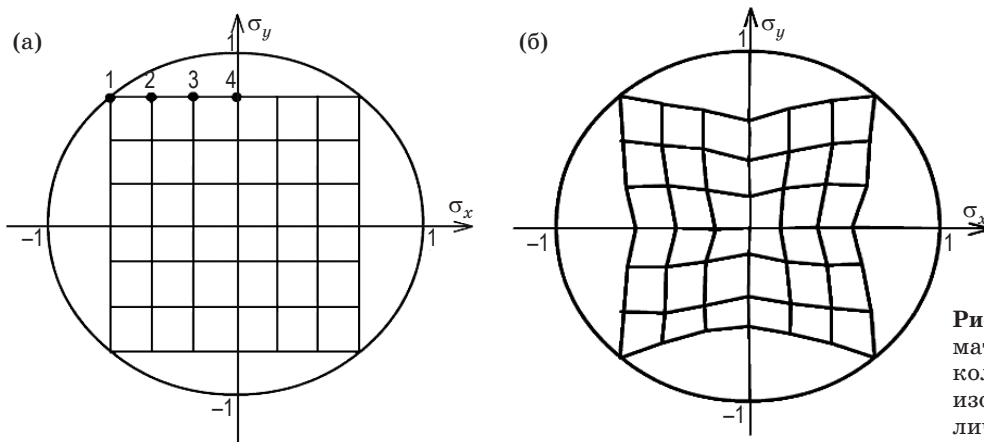


Рис. 1. Поле зрения коллиматора. а – сетка в тестовом коллиматоре, б – возможное изображение сетки при наличии дисторсии.

ставляет поле зрения, в зависимости от выбранного направления искажения или сечения (по оси x или y).

Математически это можно описать выражениями (12) и (13), где \mathbf{CS}_x – вектор косинусных и синусных коэффициентов по оси x ; \mathbf{CS}_y – вектор косинусных и синусных коэффициентов по оси y

$$\Delta \mathbf{X}' = (\lambda/NA) k_{SC} \mathbf{P}_x \mathbf{CS}_x, \quad (12)$$

$$\Delta \mathbf{Y}' = (\lambda/NA) k_{SC} \mathbf{P}_y \mathbf{CS}_y. \quad (13)$$

В этом случае смещение по оси x для каждой точки изображения описывается вектором (14), смещение по оси y – вектором (15)

$$\Delta \mathbf{X}'^T = (\Delta x'_1 \ \Delta x'_2 \ \dots), \quad (14)$$

$$\Delta \mathbf{Y}'^T = (\Delta y'_1 \ \Delta y'_2 \ \dots). \quad (15)$$

Полученные смещения представляют собой смоделированную поперечную aberrацию, вызванную фотограмметрической дисторсией. Координаты каждой точки на изображении определяются в соответствии с формулами

$$x' = x + \Delta x, \quad (16)$$

$$y' = y + \Delta y. \quad (17)$$

Таким образом, изображение сетки с учетом влияния дисторсии, описанной с помощью коэффициентов полиномов Цернике, форми-

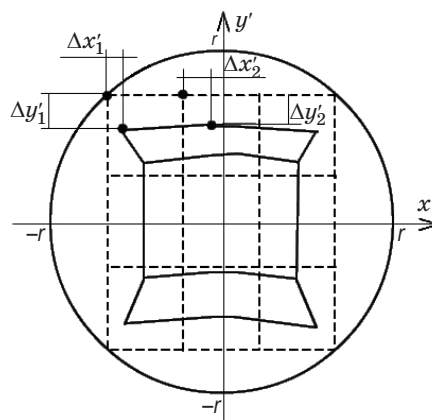


Рис. 2. Моделируемые смещения узлов сетки.

руется по вершинам сетки с учетом смещения координат вершин, вызванных влиянием дисторсии (рис. 2). Полученные коэффициенты разложения можно использовать для описания реальной, полученной по результатам экспериментальных измерений, дисторсии.

Смоделированные с помощью полиномов Цернике картины дисторсии полностью соответствуют картинам дисторсии, полученным М.М. Русиновым [2] при разложении дисторсии по степенным коэффициентам.

Одновременное влияние коэффициентов разложения C_{x11} и S_{y11} приводит к появлению так называемой нецентрированной дисторсии первого порядка (рис. 3а), S_{x11} и C_{y11} –

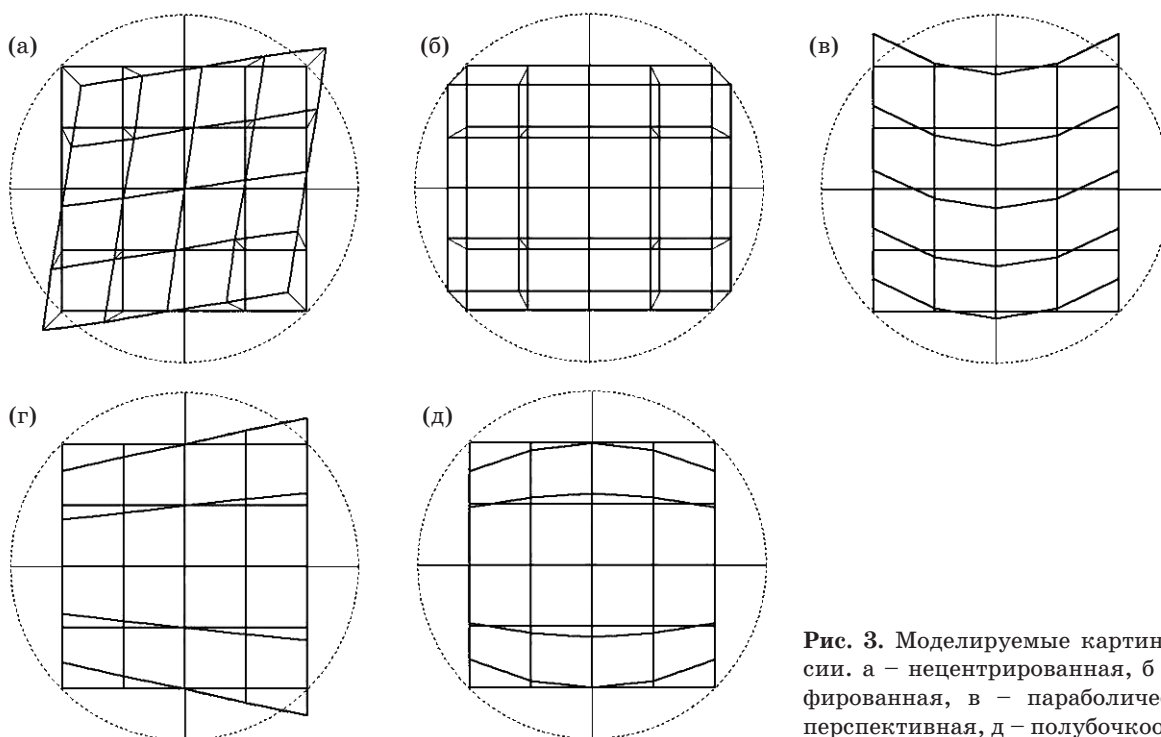


Рис. 3. Моделируемые картины дисторсии. а – нецентрированная, б – анаморфированная, в – параболическая, г – перспективная, д – полубочкообразная.

к анаморфированной дисторсии первого порядка (рис. 3б), C_y20 , C_y00 и C_y22 – к параболической дисторсии второго порядка (рис. 3в), S_y22 – к перспективной дисторсии также второго порядка (рис. 3г), C_y11 и C_y31 – к полуподушко- или бочкообразной (в зависимости от знаков коэффициентов) дисторсии третьего порядка (рис. 3д). Таким образом, предлагаемая методика позволяет смоделировать практически все основные и встречающиеся на практике варианты фотограмметрической дисторсии.

Использование полиномов Цернике в данной работе позволило не только разделить направления децентрировок, но и упростить процедуру анализа и последующей коррекции ошибок сборки и изготовления оптических систем.

Работа выполнена в рамках сотрудничества кафедры прикладной и компьютерной оптики СПБГУИТМО с НПО “Планар” (г. Минск, Республика Беларусь), “Carl Zeiss” (Оберкохен, Германия), LG (г. Сеул, Ю. Корея).

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Flagello D.* Towards a comprehensive control of full-field image quality in optical lithography // Proc. SPIE. 1997. V. 3051. P. 672–685.
2. *Русинов М.М.* Инженерная фотограмметрия. М.: Недра, 1966. 248 с.
3. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.