

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-115-123

УДК 531.742: 62.791

Матричная технология измерений. Точность измерения координат элементов и контроль фотошаблонов

Александр Николаевич Королев¹, Александр Яковлевич Лукин²,
Юрий Владимирович Филатов³, Владимир Юрьевич Венедиктов⁴✉

^{1, 3, 4}Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹al_korolev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0477-2326>

²lukin_aya@spbstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8479-1836>

³yvfilatov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4388-8033>

⁴vlad.venediktov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0728-2050>

Аннотация

Предмет исследования. Новая технология линейно-угловых измерений, основанная на использовании многоэлементной марки и получении измерительной информации об угловом и линейном сдвигах по совокупности измерений для всех элементов изображения марки; точность измерения координат элементов изображения марки в матричном измерителе. **Цель работы.** Получение оценок погрешностей измерения координат элементов изображения марки в ходе экспериментальных исследований. **Метод.** Исследование погрешности измерения координат элементов синтезированного изображения марки на основе результатов измерений. **Основные результаты.** Выполнены реальные измерения координат элементов при наличии искажений, обусловленных дисторсией объектива и погрешностями изготовления марки. Показана возможность разделения указанных искажений, измерения их параметров и коррекции до значений погрешности, полученной на цифровой модели. **Практическая значимость.** Показано, что процедура определения и коррекции искажений изображения может быть положена в основу измерительного комплекса контроля технологии изготовления фотошаблонов на всех этапах. Проведенные исследования показывают, что эта задача может быть решена на уровне погрешности 0,2 мкм для большого числа зон с плотностью до 40 000 элементов на 1 см².

Ключевые слова: матричная технология измерений, матричный измеритель, измерительная марка, коррекция искажений изображения марки

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке в рамках гранта РФФ № 20-19-00412.

Ссылка для цитирования: Королев А.Н., Лукин А.Я., Филатов Ю.В., Венедиктов В.Ю. Матричная технология измерений. Точность измерения координат элементов и контроль фотошаблонов // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 3. С. 115–123. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-115-123>

Коды OCIS: 120.0120, 230.0230

Matrix measurement technology. The accuracy of measuring the coordinates of the elements and the control of the photomasks

ALEXANDER N. KOROLEV¹, ALEXANDER YA. LUKIN²,
YURI V. FILATOV³, VLADIMIR YU. VENEDIKTOV⁴✉

^{1, 3, 4}St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

²Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

¹al_korolev@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0477-2326>

²lukin_aya@spbstu.ru <https://orcid.org/0000-0002-8479-1836>

³yvfilatov@etu.ru <https://orcid.org/0000-0002-4388-8033>

⁴vlad.venediktov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-0728-2050>

Abstract

Subject of study. A new technology for linear-angular measurements, based on the use of a multi-element mark and obtaining measurement information about the angular and linear shift from a set of measurements for all elements of the mark image; accuracy of measuring the coordinates of brand image elements in a matrix meter. **Aim of the study.** Obtaining estimates of errors in measuring the coordinates of mark image elements during experimental studies. **Method.** The error of measuring the coordinates of the elements of the synthesized image of the stamp based on the measurement results is investigated. **Main results.** Real measurements of the coordinates of the elements were performed in the presence of distortions due to lens distortion and manufacturing errors of the mark. The possibility of separating these distortions, measuring their parameters and correcting them to the error values obtained on a digital model is shown. **Practical significance.** It is shown that the procedure for determining and correcting image distortions can be used as the basis for a measuring complex for controlling the technology of manufacturing photomasks at all stages. The conducted research shows that this problem can be solved at an error level of 0.2 μm for a large number of zones with a density of up to 40 000 elements per 1 cm^2 .

Keywords: matrix measurement technology, matrix meter, measuring mark, correction of mark image distortions

Acknowledgment: this work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation, grant № 20-19-00412.

For citation: Korolev A.N., Lukin A.Ya., Filatov Yu.V., Venediktov V.Yu. Matrix measurement technology. The accuracy of measuring the coordinates of the elements and the control of the photomasks [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 3. P. 115–123. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-115-123>

OCIS codes: 120.0120, 230.0230

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений развития техники измерения линейных и угловых перемещений является использование интерференционных принципов измерений. Различные варианты построения схемы интерферометра с применением как гомодинных, так и гетеродинных подходов позволяют говорить о достижении субнанометровой точности вплоть до погрешностей на уровне десятков пикометров при измерении линейных перемещений [1, 2] и до тысячных долей угловой секунды

при измерении угловых перемещений [3]. Однако при этом интерференционные схемы измерений подвержены влиянию ряда факторов, приводящих к возникновению погрешностей, таких как влияние изменяющихся параметров воздушного промежутка, нелинейности измерительной характеристики и ряда других. Другим подходом к проведению линейных и угловых перемещений является использование энкодеров или интерференционных систем на дифракционных решетках [4–6]. Данные системы позволяют достичь весьма

высоких точностей как при измерении линейных, так и угловых перемещений [7–9].

Использование цифровых камер для решения задач измерения смещения и/или поворота широко распространено в различных областях техники [10]. Часто измеряется смещение естественных объектов [11], однако наилучшие результаты достигаются при применении специальных марок [12–14]. Точность измерений при таком подходе характеризуется погрешностью линейных измерений на уровне единиц микрометров, что существенно уступает оценкам, полученным в данной работе.

Альтернативным подходом, представленным в данной работе, является матричная технология измерения линейных и угловых координат [15]. В данной технологии используется оптико-цифровая измерительная схема с оптической маркой, имеющей очень большое количество элементов (десятки и сотни тысяч). Одновременная регистрация изображения всех элементов марки с помощью цифровой камеры с последующим вычислением их координат повышает точность измерения углового и линейного положений марки в сотни и более раз. Для новых измерителей прогнозируемая погрешность находится на уровне долей нанометра в линейной шкале и тысячных долей угловой секунды в угловой шкале. В процессе исследований по созданию новых матричных измерителей были выявлены взаимосвязи и получены оценки, представляющие научный интерес. Поэтому представляется целесообразной публикация цикла статей, посвященных новой измерительной технологии и отражающих промежуточные результаты исследований на пути создания оптимальных вариантов конструкций матричных измерителей с прогнозируемыми метрологическими характеристиками. Целью данной работы было получение оценок погрешностей измерения координат элементов изображения марки в ходе экспериментальных исследований.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ МАРКИ В ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ

Поскольку точность измерений матричного измерителя зависит от точности измерения координат элементов [15], то в данной статье проведены всесторонние исследования этого параметра с учетом всех влияющих факторов.

В матричных измерителях объектом измерения является многоэлементная марка, выполненная в виде периодической структуры [15].

Размер элементов и период марки выбираются из соображений минимума погрешности определения координат марки. Уменьшение размера элементов с одной стороны увеличивает погрешность определения их координат, с другой — позволяет увеличить их количество, что уменьшает погрешность среднего значения. При этом период марки выбирается с учетом разрешающей способности оптико-электронного тракта: изображения элементов не должны пересекаться. Итоговая погрешность имеет отчетливый минимум, соответствующий оптимальному варианту параметров марки. Для реальной разрешающей способности и размера пикселей при таком подходе оптимальным оказывается вариант с периодом 50 мкм и диаметром элемента 30 мкм. Эксперименты проводились для минимальной конфигурации измерителя: размер шкалы менее 10 мм, с цифровой камерой 1,3 Мпикс.

Как уже указывалось в работах [15–17], в исследованиях широко используются методы цифрового моделирования измерительных процессов. С помощью генератора изображений возможно сформировать изображение измерительной марки с любыми заданными параметрами, включая форму, размер и период элементов марки, пространственный и угловой сдвиги, размытие за счет заданной оптической передаточной функции (ОПФ) объектива, пространственные искажения, обусловленные дисторсией объектива, наложение шума аддитивного или мультипликативного. Такое модельное изображение отличается от реального лишь отсутствием воздействия окружающей среды.

Поэтому начальный этап исследований точности измерения координат элементов был выполнен на модельном изображении измерительной марки с размытием дифракционно ограниченной ОПФ объектива с граничной частотой, равной частоте Найквиста фотоприемной матрицы, что соответствует пространственной частоте $1/(2b) = 96 \text{ мм}^{-1}$ в случае цифровой камеры 1,3 Мпикс с размером пиксела $b = 5,2 \text{ мкм}$, (1360×1040 пикселей). В наложенном мультипликативном шуме, параметры которого были определены экспериментально, максимальное значение среднеквадратического отклонения (СКО) не превышало 4 уровней квантования.

Изображение элемента марки в форме круга диаметром $30/5,2 = 5,77$ пиксела на рис. 1 соответствует указанной модели. Общее число элементов в поле камеры составляло примерно 15000.

По результатам анализа изображения марки программа вычисляет координаты каждого элемента по алгоритму центра тяжести и затем определяет глобальную матрицу $B_{m,n}$, которая является наилучшим приближением к реальному измеренному массиву координат изображения элементов измерительной марки $A_{m,n}$ в соответствии с критерием наименьших квадратов, т.е.

$$\sum_{m,n} ((Xa_{m,n} - Xb_{m,n})^2 + (Ya_{m,n} - Yb_{m,n})^2) \rightarrow \min, \quad (1)$$

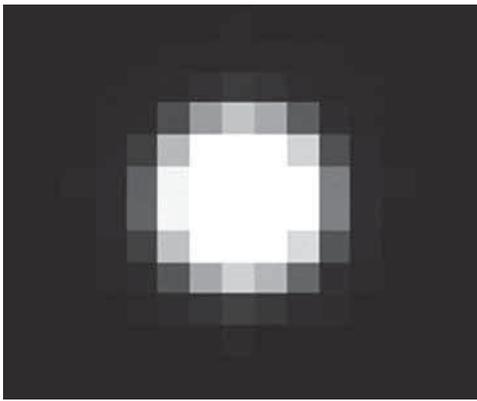


Рис. 1. Изображение элемента марки
Fig. 1. The mark element image

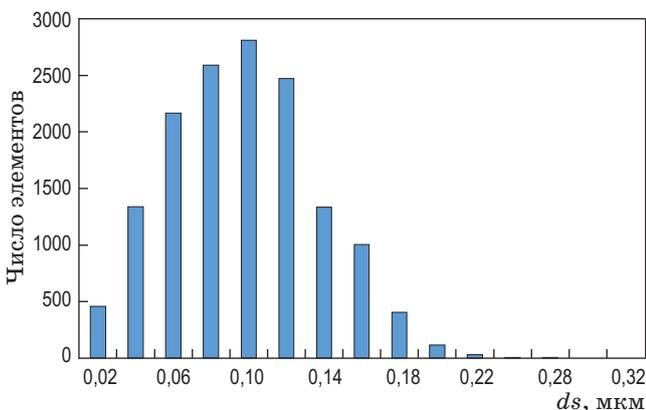


Рис. 2. Гистограмма погрешности определения координат модельного изображения элементов марки
Fig. 2. Histogram of the error in determining the coordinates of the mark elements for the model image

где $Xa_{m,n}$, $Ya_{m,n}$ — измеренные координаты изображения элементов марки $A_{m,n}$, $Xb_{m,n}$, $Yb_{m,n}$ — координаты элементов глобальной матрицы $B_{m,n}$.

Затем программа вычисляет сдвиги между координатами элементов и соответствующими координатами глобальной матрицы

$$dx = Xa_{m,n} - Xb_{m,n},$$

$$dy = Ya_{m,n} - Yb_{m,n}.$$

Для модельного изображения, не имеющего каких-либо координатных искажений кроме дискретизации, размытия и шума, отклонения dx , dy имеют нормальное распределение с СКО 0,06 мкм. Модуль

$$ds = \sqrt{(dx^2 + dy^2)}$$

может служить мерой точности измерения координат изображения элементов марки.

Гистограмма результатов измерения ds (рис. 2) соответствует квадратичному сложению двух нормально распределенных величин и не выходит за диапазон 0,22 мкм. Среднеквадратическое отклонение векторов отклонения по всем элементам составляет в данном случае 0,09 мкм. Погрешность определения координат элементов складывается из погрешности метода (определение координат по центру тяжести пиксельного изображения) и случайной погрешности, связанной с наличием шума. Обе погрешности имеют примерно одинаковую дисперсию, однако погрешность, вызванная шумом, может быть значительно уменьшена путем многократных измерений.

Таким образом, можно утверждать, что погрешность измерения координат изображения элементов марки для данной модели находится в диапазоне 0,1–0,2 мкм.

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕАЛЬНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ МАРКИ, ВЫЧИСЛЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ

Теперь рассмотрим процесс измерений на реальном изображении марки.

Очевидно, что для повышения точности измерений угла необходимо минимизировать искажения изображения марки.

В реальной системе эти искажения связаны с двумя основными факторами —

1. погрешностями изготовления самой марки,
2. искажениями изображения марки, обусловленными дисторсией объектива.

Успешное решение этой задачи описано в публикации [18] для марки меньшей плотности (период 150 мкм) в матричном измерителе угла с погрешностью $\pm 0,5''$. Показано, что представленная в работе технология анализа и обработки изображений позволяет восстанавливать метрику изображения периодических структур и корректировать указанные выше искажения в диапазоне малых значений, составляющих доли пиксела фотоприемной матрицы. При этом СКО модуля сдвига векторов ds уменьшается в 15 раз и достигает значения 0,015 пиксела (менее 0,1 мкм), что соответствует значениям СКО ds для модельных изображений в отсутствии каких-либо структурных искажений.

ОЦЕНКА СЛУЧАЙНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА, КООРДИНАТЫ И ПЕРИОДА МАРКИ

Создание матричных измерителей с разрешением и погрешностью на уровне единиц нанометров и единиц угловых секунд не имеет проблем. Однако, очевидно, что получение высоких прогнозируемых уровней точности является непростой задачей, поскольку требует

высочайшего уровня температурной стабилизации и деформационной стойкости конструкции прибора. Подобные измерители находятся в настоящее время в стадии исследований и разработок.

В то же время авторы посчитали необходимым уже на текущем этапе исследований подтвердить реальность прогнозируемых параметров. Было принято решение использовать естественный процесс стабилизации, допуская при этом перепад температур в несколько градусов и измеряя значения метрических величин в одной точке в течение нескольких часов. Такие процессы описываются гладкими аналитическими функциями, что позволяет исключить тренд и выявить случайную погрешность измерения.

На рис. 3–5 приведены графики измерительных треков значений угла φ , координаты X и периода H (с вычитанием начального значения) за время 200 мин и графики случайной погрешности измерений, полученные путем вычитания тренда.

Из рисунков видно, что при слабом выделении тепла и отсутствии активного теплоотвода графики дрейфа измеряемых значений (рис. 3а, 4а, 5а) являются гладкими функциями, что дает возможность после вычитания тренда получить значения случайной погрешности за время проведения эксперимента.

Итоги таковы. За время 200 мин зарегистрированные прибором изменения измеряемой величины составили по углу $0,6''$,

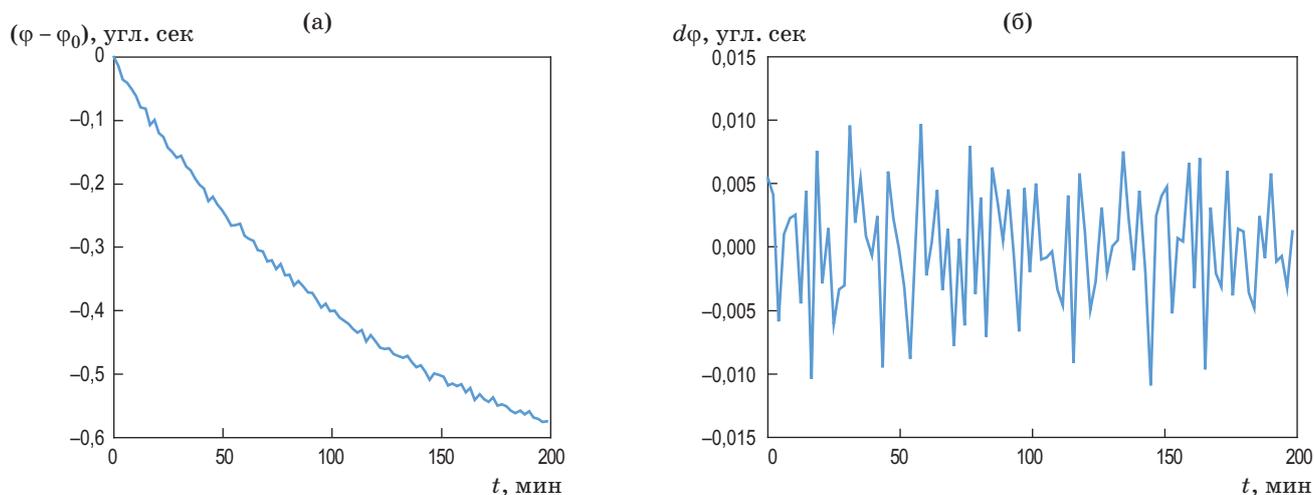


Рис. 3. Дрейф результата измерения угла φ (а) и случайная погрешность измерения $d\varphi$ (б)

Fig. 3. (a) The drift of angle measurement result φ and (b) random measurement error $d\varphi$

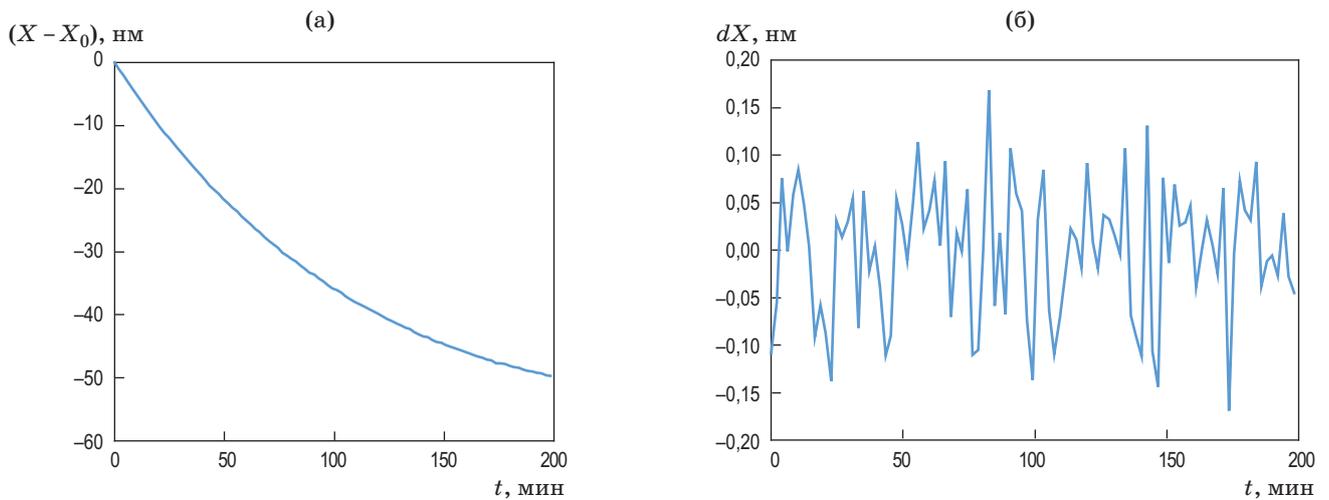


Рис. 4. Дрейф результата измерения координаты X (а) и случайная погрешность измерения dX (б)

Fig. 4. (a) The drift of measurement result of the X coordinate and (б) random measurement error dX

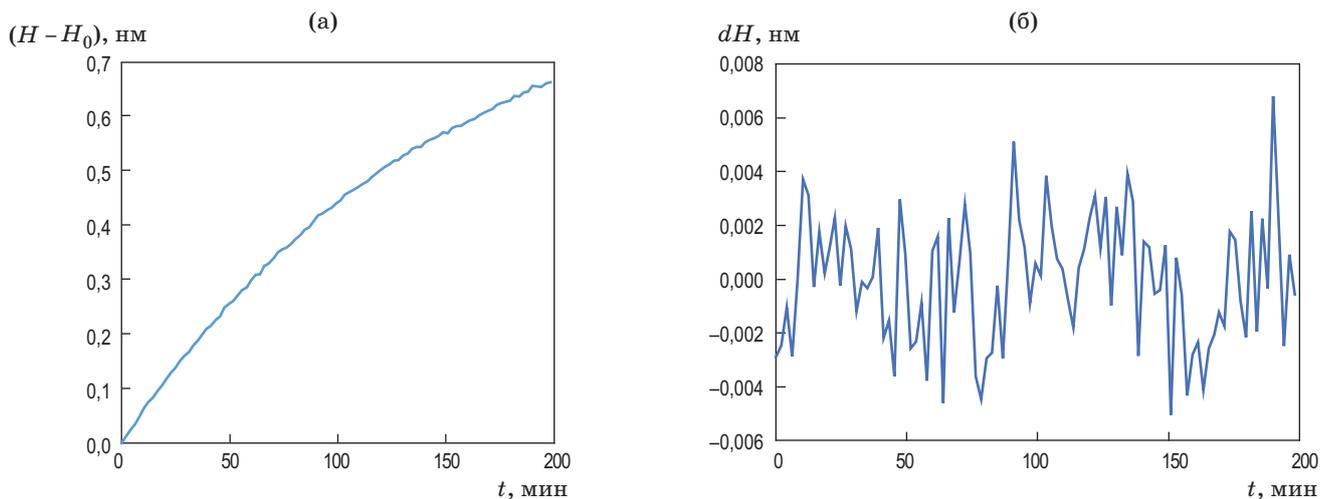


Рис. 5. Дрейф результата измерения периода H (а) и случайная погрешность измерения dH (б)

Fig. 5. (a) The drift of measurement result of the period H and (б) the random measurement error dH

по координате 50 нм и по периоду марки 0,7 нм. Расчеты СКО случайной погрешности графиков на рис. 3б, 4б, 5б показали в случае угловой координаты $0,005''$, в случае линейной — 0,05 нм и для периода марки — 0,003 нм.

Полезно напомнить, что инструментами для формирования измерительной информации являются в нашем случае объектив и цифровая камера, разрешающая способность которых составляет несколько микрометров, а размеры марки и фотоприемной матрицы не превышают 10 мм.

ВЫЯВЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОШАБЛОНА И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТРИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ В ФОТОЛИТОГРАФИИ

На рис. 6 приведена структура векторов, отображающих смещение элементов изображения марки относительно идеальной решетки. Масштаб векторов на рис. 6 отличается от масштаба марки в 200 раз. Значения векторов сдвига достигают нескольких мкм. Заметно, что основной вклад в искажения вносит дисторсия.

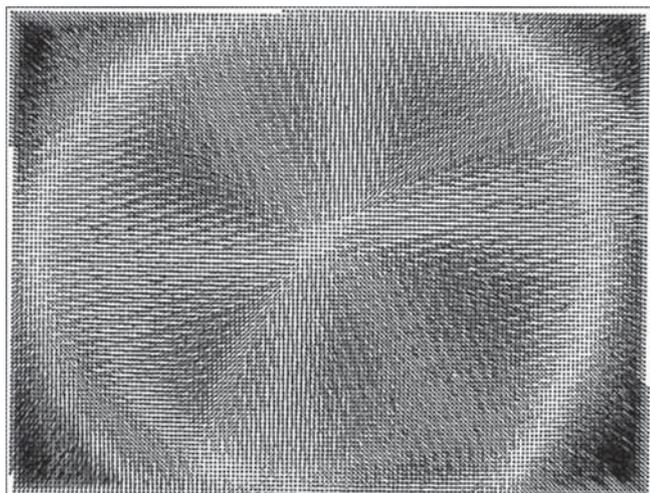


Рис. 6. Векторы смещения изображений элементов марки относительно идеальной решетки, увеличенные в 200 раз

Fig. 6. The displacement vectors of the images of the mark elements relative to the ideal lattice, magnified 200 times

В этом случае задача состоит в том, чтобы искажения изображения (сдвиги) размером в несколько микрометров разделить на искажения от дисторсии объектива и влияние погрешности самой марки, вычислить их параметры и сформировать программные модули коррекции, которые бы обеспечили восстановление изображения марки в процессе измерений.

Основной принцип разделения искажений состоит в том, что погрешности изготовления марки привязаны к элементу марки, а искажения, вызванные дисторсией, привязаны к полю изображения.

Поэтому для выявления тех и других искажений выполняется анализ серии изображений марки в различных положениях. В данном случае использовалась серия из 20 изображений с линейным сдвигом 25 мкм.

По результатам расчетов формируются описание дисторсии и марки. Отклонения, связанные с дисторсией объектива, аппроксимируются полиномом 5-й степени.

Описание марки представляет собой массив данных реальных сдвигов элементов марки относительно идеальной периодической решетки, полученных при изготовлении фотошаблона или его копии. Картина векторов сдвига, соответствующая этому файлу, при-

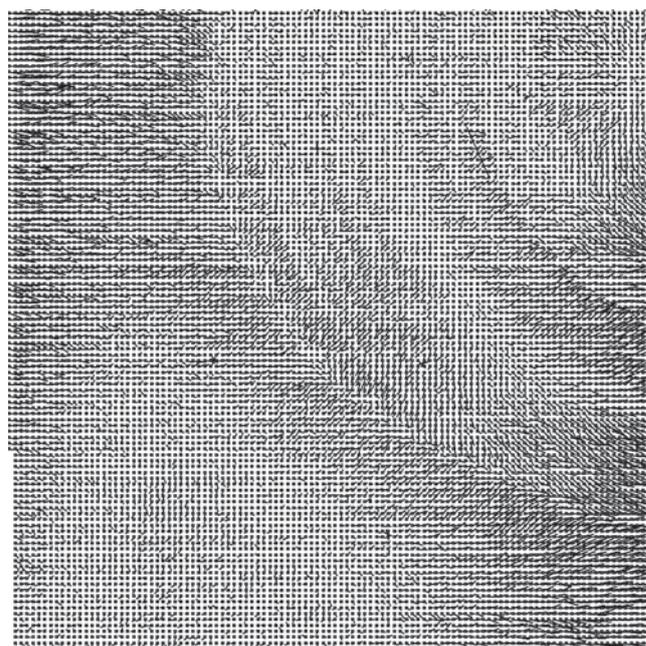


Рис. 7. Сдвиги элементов марки относительно идеальной решетки, увеличенные в 300 раз

Fig. 7. Shifts of the mark elements relative to the ideal lattice, magnified by 300 times

ведена на рис. 7. Масштаб векторов сдвига увеличен в 300 раз. Хорошо видна кольцевая структура сдвигов, причиной которой может быть нарушение технологии сушки копий на фотоэмульсии, возможно, на стадии резки на отдельные модули. Гистограмма показывает максимальные сдвиги для искажений марки порядка 0,5 мкм.

Измерение с коррекцией дисторсии и искажений марки дает значение СКО векторов сдвига 0,09 мкм, что совпадает с оценками погрешности измерений для модельного изображения, лишенного реальных искажений, требующих коррекции.

Таким образом, имеется возможность выполнить коррекцию искажений, влияющих на точность измерений. Можно утверждать, что реальные искажения марки в пределах нескольких микрометров отлично выявляются, корректируются и, на самом деле, практически не сказываются на результатах измерения.

В то же время, построенное в рамках приведенной выше технологии описание марки позволяет выявить проблемы в процессе изготовления фотошаблонов, а также их копий и модулей. В ходе исследований приходилось неоднократно сталкиваться с отклонениями

координат элементов выше стандартных значений. Поскольку в измерительных задачах удобнее использовать шаблоны на фотоэмульсии (белое на черном), а не хром на стекле с высоким коэффициентом отражения, появление этих отклонений возможно связано с недостатками именно технологии копирования.

Существует ОСТ 4Г 0.073.210-84 Фотошаблоны прецизионные. Общие технические условия. В данном ОСТе классы точности определяются значениями допусков на размеры малых (менее 1 мкм) топологических элементов, которые составляют 0,6 и 0,2 мкм для шаблонов высоких классов точности Д и Е.

В связи с этим считаем возможным предложить использование описанной выше технологии матричных измерений для комплексного контроля технологии изготовления фотошаблонов, их копий и отдельных модулей. По мнению авторов настоящей статьи использование матричной технологии позволяет реализовать главную задачу контроля — определение во множестве зон фотошаблона отклонений координат элементов марки от расчетных значений, соответствующих координатам идеальной решетки (глобальной матрицы).

Проведенные исследования показывают, что эта задача может быть решена на уровне погрешности 0,2 мкм для большого количества зон с плотностью до 40000 элементов на 1 см².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты модельных и экспериментальных исследований точности измерения координат элементов изображения марки. Показаны возможности оценки искажений координат элементов изображения, связанных с дисторсией объектива и искажениями марки, а также коррекции этих изображений. Полученное СКО отклонения координат элементов изображения марки от координат элементов глобальной матрицы после коррекции искажений составляет менее 0,1 мкм и практически совпадает с СКО для цифровой модели при полном отсутствии искажений. Получены экспериментальные результаты оценки случайной погрешности измерений значений угла, координаты и периода марки, составляющие соответственно 0,005'', 0,05 нм и 0,003 нм. Полученные оценки совпадают с прогнозом и с теоретическими оценками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bridges A., Yacoot A., Kissinger T., Humphreys D.A., Tatam R.P. Correction of periodic displacement non-linearities by two-wavelength interferometry // *Measurement Sci. and Technol.* 2021. V. 32. № 12. P. 125202. <http://doi.org/10.1088/1361-6501/ac1dfa>
2. Peggs G.N., Yacoot A. A review of recent work in subnanometre displacement measurement using optical and X-ray interferometry // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sci.* 2002. V. 360. № 1794. P. 953–968. <http://doi.org/10.1098/rsta.2001.0976>
3. Wang X., Su J., Yang J., Miao L., Huang T. Investigation of heterodyne interferometer technique for dynamic angle measurement: Error analysis and performance evaluation // *Measurement Sci. and Technol.* 2021. V. 32. № 10. P. 105016. <http://doi.org/10.1088/1361-6501/ac0d77>
4. Wentao Zhang, Wang Yulin, Hao Du, Qilin Zeng, Xianming Xiong. High-precision displacement measurement model for the grating interferometer system // *Optical Engineering.* 2020. V. 59. № 4. P. 045101. doi.org/10.1117/1.OE.59.4.045101
5. Kimura A., Hosono K., Kim W., Shimizu Y., Gao W., Zeng L. A two-degree-of-freedom linear encoder with a mosaic scale grating // *Internat. J. Nanomanufacturing.* 2011. V. 7. № 1. P. 73–91. <http://doi.org/10.1504/IJNM.2011.039964>
6. Zherdev A.Y., Odinokov S.B., Lushnikov D.S., Markin V.V., Gurylev O.A., Shishova M.V. Optical position encoder based on four-section diffraction grating // *Proc. SPIE — The Internat. Soc. for Optical Engineering.* 2017. 10233. Art. № 102331I. <http://doi.org/10.1117/12.2304939>
7. Yunfei Yin, Zhaowu Liu, Shan Jiang, et al. High-precision 2D grating displacement measurement system based on double-spatial heterodyne optical path interleaving // *Optics and Lasers in Engineering.* 2022. V. 158. P. 107167. <http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107167>
8. Yunfei Yin, Lin Liu, Yu Bai, et al. Littrow 3D measurement based on 2D grating dual-channel equal-optical path interference // *Optics Express.* 2022. V. 30. № 23. P. 41671. <http://doi.org/10.1364/oe.475830>
9. Changhai Zhao, Qiuhua Wan, Lihui Liang. Compensation for dynamic subdivision error when the grating displacement sensor code disk is stained // *IEEE Sensors J.* 2023. V. 23. № 3. P. 2403. <http://doi.org/10.1109/jsen.2022.3232708>
10. Xu, Y., Brownjohn, J.M.W. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures // *J. Civil. Struct. Health Mon.* 2018. V. 8. P. 91–110. <http://doi.org/10.1007/s13349-017-0261-4>
11. Feng D., Feng M.Q., Ozer E., Fukuda Y. A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement // *Sensors.* 2015. V. 15. P. 16557–16575. <http://doi.org/10.3390/s150716557>
12. Cheng F., Zhou D., Yu Q., Tjahjowidodo T. New image grating sensor for linear displacement measurement and its error analysis // *Sensors.* 2022. V. 22. P. 4361. <http://doi.org/10.3390/s22124361>

13. Liu B., Zhang D., Guo J., Zhu C. Vision-based displacement measurement sensor using modified Taylor approximation approach // *Opt. Eng.* 2016. V. 55. P. 114103. <http://doi.org/10.1117/1.OE.55.11.114103>
14. André N., Sandoz P., Mauzé B., Jacquot M., Laurent G.J. Robust phase-based decoding for absolute (X, Y, Θ) positioning by vision // *IEEE Trans. Inst. Meas.* 2021. V. 70. P. 1–12. <http://doi.org/10.1109/TIM.2020.3009353>
15. Королев А.Н., Лукин А.Я., Филатов Ю.В., Венедиктов В.Ю. Матричная технология линейно-угловых измерений // *Оптический журнал.* 2022. Т. 89. № 12. С. 54–64. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-12-54-64>
Korolev A.N., Lukin A.Ya., Filatov Yu.V., Venediktov V.Yu. Matrix technology of linear-angular measurements // *Journal of Optical Technology.* 2022. V. 89. № 12. P. 733–739. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000733>
16. Королев А.Н., Лукин А.Я., Полищук Г.С. Новая концепция измерения угла. Модельные и экспериментальные исследования // *Оптический журнал.* 2012. Т. 79. № 6. С. 52–58. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-12-54-64>
Korolev A.N., Lukin A.Ya., Polishchuk G.S. New concept of angular measurement. Model and experimental studies // *Journal of Optical Technology.* 2012. V. 79. № 6. P. 352–356. <https://doi.org/10.1364/JOT.79.000352>
17. Бохман Е.Д., Венедиктов В.Ю., Королев А.Н., Лукин А.Я. Цифровой измеритель угла с двумерной шкалой // *Оптический журнал.* 2018. Т. 85. № 5. С. 19–25. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-05-19-25>
Bokhman E.D., Venediktov V.Yu., Korolev A.N., Lukin A.Ya. Digital goniometer with a two-dimensional scale // *Journal of Optical Technology.* 2018. V. 85. № 5. P. 269–274. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000269>
18. Korolev A.N., Lukin A.Ya., Filatov Y.V., Venediktov V.Y. Reconstruction of the image metric of periodic structures in an opto-digital angle measurement system // *Sensors.* 2021. V. 21. P. 4411. <http://doi.org/10.3390/s21134411>

АВТОРЫ

Александр Николаевич Королев — доктор технических наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197022, Россия; Scopus ID: 57196658289; <https://orcid.org/0000-0003-0477-2326>; al_korolev@mail.ru

Александр Яковлевич Лукин — кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Россия; Scopus ID: 7102950433, <https://orcid.org/0000-0002-4388-8033>, lukin_aya@spbstu.ru

Юрий Владимирович Филатов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197022, Россия; Scopus ID: 7005082620, <https://orcid.org/0000-0002-4388-8033>, yvfilatov@etu.ru

Владимир Юрьевич Венедиктов — доктор физико-математических наук, профессор, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197022, Россия; Scopus ID: 7004670701, <https://orcid.org/0000-0002-0728-2050> vlad.venediktov@mail.ru

AUTHORS

Alexander N. Korolev — Dr. Sci. (Engineering), Main Scientific Employee of the Saint-Petersburg State Electrotechnical University, St. Petersburg, 376022, Russia; Scopus ID: 57196658289; <https://orcid.org/0000-0003-0477-2326>; al_korolev@mail.ru

Alexander Ya. Lukin — PhD (Engineering), Associate Professor of the Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russia; Scopus ID: 7102950433, <https://orcid.org/0000-0002-4388-8033>, lukin_aya@spbstu.ru

Yuri V. Filatov — Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of Department of the Saint-Petersburg State Electrotechnical University, St. Petersburg, 376022, Russia; Scopus ID: 7005082620, <https://orcid.org/0000-0002-4388-8033>, yvfilatov@etu.ru

Vladimir Yu. Venediktov — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Professor of the Saint-Petersburg State Electrotechnical University, St. Petersburg, 376022, Russia; Scopus ID: 7004670701, <https://orcid.org/0000-0002-0728-2050> vlad.venediktov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.10.2023
Одобрена после рецензирования 07.12.2023
Принята к печати 28.01.2024

The article was submitted to the editorial office 18.10.2023
Approved after review 07.12.2023
Accepted for publication 28.01.2024