

УДК 621.397.331.29

МЕТОД КАЛИБРОВКИ ЛАЗЕРНОЙ ГАЛЬВАНОМЕТРИЧЕСКОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СУБМИКРОННОГО РАЗРЕШЕНИЯ*

В. П. Бессмельцев, Н. В. Голошевский, В. В. Кастеров,
Я. А. Киприянов, К. К. Смирнов

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: nickolayg@iae.nsk.su*

Рассмотрен метод калибровки модулей сканирования на основе дефлекторов гальванометрического типа, основанный на двухшаговом итерационном алгоритме обработки профилометрической карты тестовой записи калибруемого модуля. Показано, что получить высокую точность и робастность определения координат реперных точек тестовой записи возможно при нахождении приблизительного положения таких точек и выделении фрагмента в их окрестности на первом шаге и при поиске точных значений координат корреляционным методом на втором шаге. Использование этого метода и простого алгоритма кусочно-планарной интерполяции даёт возможность обеспечить позиционирование лазерного луча с относительной погрешностью 10^{-5} от поля записи.

Ключевые слова: лазерная микрообработка, гальванометрические дефлекторы, комплиментарные системы сканирования, метод кросскорреляции.

DOI: 10.15372/AUT20180411

Введение. В настоящее время применение модулей двухкоординатного сканирования лазерного пучка на базе угловых гальванометрических зеркальных дефлекторов стало типовым решением в лазерных системах, где одновременно требуются высокая скорость и пространственное разрешение позиционирования луча. Использование для управления дефлекторами обратной связи по датчику углового положения обеспечивает разрешение до $2^{18}\text{--}2^{24}$ угловых позиций, воспроизводимость $3 \cdot 10^{-6}$, долговременную стабильность $1,5 \cdot 10^{-5}$ (8 часов), линейность 99,9 % в углах $\pm 20^\circ$ (для зеркал с апертурой 14 мм) [1, 2]. Применение современных объективов [3] с соотношением $L/d \sim 10^3$ (где L — размер поля сканирования, d — диаметр пучка в фокусе) совместно с вышеуказанными дефлекторами позволяет осуществить сканирование с субмикронным разрешением на поле в десятки миллиметров и погрешностью позиционирования $\delta \sim 10^{-5}$ от размера поля сканирования.

Для сканирующих модулей отображение D расчётных входных данных положения лазерного луча (x, y) в реальную позицию (\bar{x}, \bar{y}) на плоскости записи/обработки зависит от взаимного положения зеркал дефлекторов, дисторсии фокусирующего объектива, качества юстировки и т. д. [4]. При настройке прецизионных систем на основе гальванометрических дефлекторов необходимо выполнить калибровку — определить алгоритм корректировки (или коррекции) входных значений (\hat{x}, \hat{y}) , при которых реальная позиция лазерного луча приближалась бы расчётную ошибку к заданной. Для некоторых систем с требованиями к относительным ошибкам позиционирования на уровне $\delta \sim 10^{-2}$ задача коррекции входных данных может решаться аналитически [5, 6]. Однако для сложных прецизионных систем

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (государственная регистрация № АААА-А17-117060810013-2).

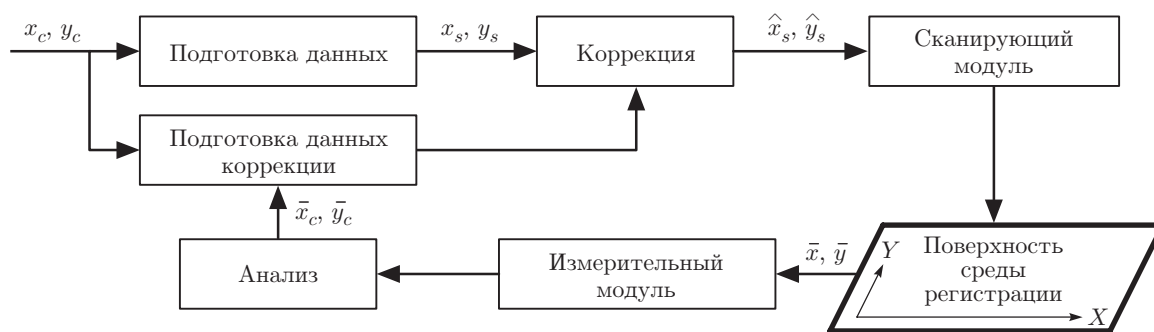


Рис. 1. Функциональная схема процесса калибровки системы

из-за большого количества неизвестных, таких как аберрации фокусирующего объектива, параметры юстировки оптических элементов, нахождение аналитического представления D в большинстве случаев невозможно.

Процесс калибровки обобщённо представим в виде схемы на рис. 1. Калибровочный объект является массивом специальных элементов топологии (реперных точек) с известными координатами (x_c, y_c) . В процессе подготовки данных координаты (x_c, y_c) преобразуются в управляющие воздействия дефлекторов (x_s, y_s) . Управляющие воздействия без коррекции $(\hat{x}_s = x_s, \hat{y}_s = y_s)$ поступают на вход сканирующего модуля, осуществляющего развёртку сфокусированного лазерного пучка на поверхности регистрирующей среды с такими параметрами лазерного луча, которые могут обеспечить регистрацию траектории его перемещения на материале тест-объекта. Далее с помощью измерительного модуля формируется карта поля сканирования, содержащая информацию о зарегистрированной топологии калибровочного объекта, и выполняется её анализ — осуществляется поиск координат реперных точек (\bar{x}_c, \bar{y}_c) . Затем при подготовке данных коррекции определяются различия между найденными координатами и их модельными значениями $\Delta x = \bar{x}_c - x_c$, $\Delta y = \bar{y}_c - y_c$ и происходит поиск таких параметров корректирующих преобразований $F_x(x_s, y_s)$, $F_y(x_s, y_s)$, чтобы Δx , Δy во всём поле сканирования были меньше заданной ошибки. Результаты преобразования используются для коррекции управляющих воздействий $\hat{x}_s = F_x(x_s, y_s)$, $\hat{y}_s = F_y(x_s, y_s)$.

В работах [4–8] в качестве калибровочного объекта применяется прямоугольная сетка из вертикальных и горизонтальных линий с равномерным шагом, реперными точками считаются её узлы. Метод аппроксимации преобразований F_x, F_y полиномами третьей степени [7], коэффициенты которых определяются методом наименьших квадратов по реперным точкам, позволяет после калибровки осуществлять сканирование с $\delta \sim 10^{-4}$. В [8] смещения $\Delta x, \Delta y$, найденные для каждой реперной точки, являются корректирующими значениями для расчёта управляющих воздействий в соответствующем узле. Внутри любого четырёхугольника с вершинами из четырёх узлов корректирующие значения вычисляются методом билинейной интерполяции. Такой подход позволяет достичь погрешности $\delta \sim 10^{-3}$ при размере поля записи 120×120 мм для сетки 15×15 линий, при этом считается, что погрешность будет уменьшаться с увеличением количества линий сетки. Также для повышения точности возможна комбинация методов, предложенных в [7, 8].

Однако ни в одной из известных авторам публикаций не описана возможность позиционирования луча в поле обработки с точностью, сравнимой с предельными характеристиками дефлекторов. В вышеуказанных работах основное внимание уделяется алгоритмам коррекции и подготовке данных для коррекции, при этом не рассматривается влияние ошибок измерения и анализа калибровочного объекта на конечный результат.

Цель предлагаемого исследования — разработка метода калибровки модулей сканирования на основе дефлекторов гальванометрического типа, позволяющего максимально использовать их точностные характеристики, и его экспериментальная проверка.

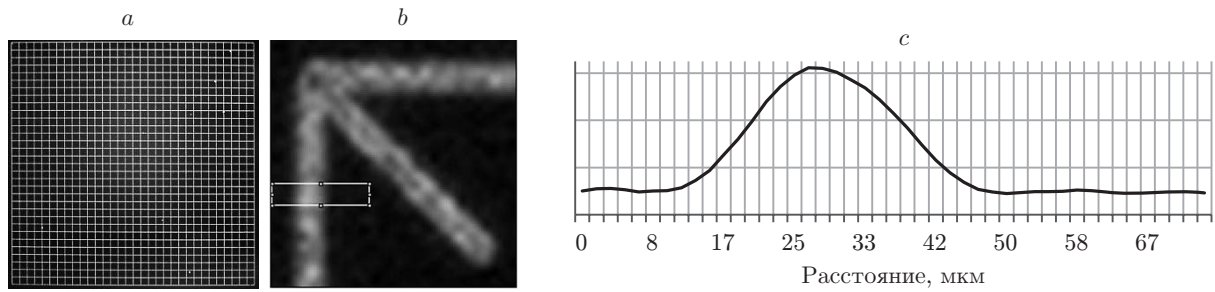


Рис. 2. Изображение калибровочной сетки, полученное видеокамерой (разрешение 3840×2748 , размер пикселя 1,67 мкм, объектив $1,0\times$): *a* — полное изображение, *b* — фрагмент, *c* — усреднённый профиль интенсивности

Методика формирования и измерения тестовых объектов. Формирование калибровочных объектов возможно осуществлять методами изменения оптической плотности материала и гравирования материала среды регистрации. Применяемые материалы должны быть однородными, с оптическим качеством поверхности и достаточным поглощением в диапазоне длин волн используемого источника. При этом сформированный на материале тест-объект уже не может быть определён как однозначное отображение D массива (x_c, y_c) на плоскость XU поверхности среды регистрации, поскольку содержит как случайные ошибки управления дефлекторами, шум лазерного источника регистрации, влияющий на размер зоны регистрации, шумы материала и процесса регистрации, микродефекты поверхности, так и систематические, например, изменение размера лазерного пятна в плоскости записи из-за дисторсионных искажений. Используя пороговый характер процесса гравирования и гауссово распределение плотности мощности в сфокусированном лазерном пучке, можно получить линии шириной менее размера сфокусированной в фокальной плоскости точки, при этом поперечный профиль глубины полученных на материале линий будет в первом приближении также иметь гауссово распределение. Для таких объектов использование в качестве средства измерения сканирующего профилометра с точечным сенсором обеспечивает существенно меньшие погрешности измерения параметров линии, чем системы технического зрения, поскольку отсутствуют искажения, вносимые оптическими элементами системы (освещающей и приёмной частей). Для сравнения на рис. 2 и 3 представлены изображения калибровочной сетки 33×33 линии размером 6×6 мм, отгравированной на полированной кремниевой пластине с помощью лазерной сканирующей системы с точкой диаметром 5 мкм в фокусе по e^{-2} , а также её углового фрагмента. Изображения на рис. 2, *a, b* получены с помощью системы технического зрения, на рис. 2, *c* показан профиль интенсивности выделенной зоны. На рис. 3, *a* приведена профилограмма

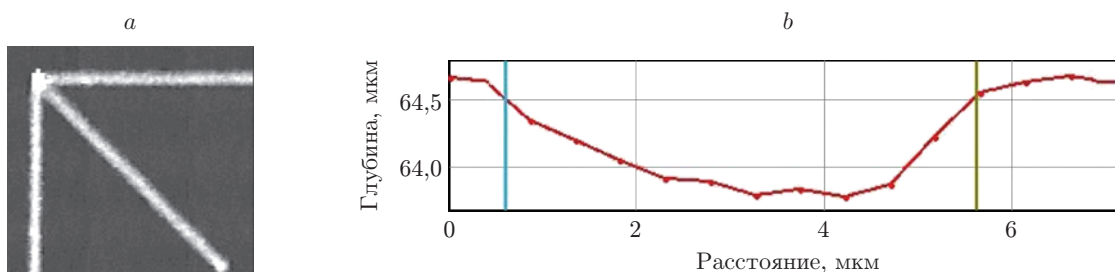


Рис. 3. Профилограмма калибровочной сетки: *a* — фрагмент, *b* — профиль ширины линии (шаг дискретизации по осям x, y 250 нм)

того же фрагмента (яркость кодирует глубину), полученная с помощью профилометра с конфокальной хроматической системой Stil SA [9] в качестве датчика расстояния (контроллер Optima, измерительная головка CL1 MG210 с разрешением по оси Z до 5 нм) и системой перемещения измеряемого образца размером до 200×200 мм с разрешением 100 нм, точностью позиционирования $\pm 0,4$ мкм и воспроизводимостью $\pm 0,1$ мкм. На рис. 3, *b* показан типичный поперечный профиль линии.

Методика анализа тестовых изображений. В наших экспериментах калибровочным объектом является прямоугольная равномерная сетка из вертикальных и горизонтальных линий. Для поиска реперных точек на карте калибровочного объекта удобнее всего представлять сетку в виде двумерного полутонового изображения, на котором интенсивность соответствует глубине.

Известен ряд методов поиска координат узлов сетки для калибровки оптического тракта измерительных систем с помощью видеокамер [10, 11], основанных на стандартных алгоритмах: преобразования Хафа, детектора углов Харриса. Однако их применение для реальных топологических карт калибровочных объектов, содержащих дефекты в виде микроцарапин и шумы края линии на уровне 10 %, приводит к большому количеству ошибок при определении координат узлов. Получить требуемую точность с учётом вышеуказанных особенностей изображений удалось путём следующей двухступенчатой процедуры.

На первом этапе используется модифицированная версия алгоритма поиска узлов сетки [12] в силу его робастности к цифровым шумам изображения и дефектам поверхности образцов типа царапин. В данном алгоритме суммируется значение интенсивности на изображении вдоль осей Oy и Ox для каждой строки и столбца. Найденные при этом координаты максимумов суммарной интенсивности по строкам и по столбцам полагаются соответствующими координатам узлов $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$ (где i, j — порядковые номера узла по вертикали и горизонтали). Эксперименты показали, что полученные на данном этапе координаты отклоняются от реальных позиций не более чем на 10 % ширины ячейки сетки.

Второй этап состоит в применении метода кросскорреляции с использованием найденных координат $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$. Изображение калибровочного объекта разбивается на фрагменты размерами $w = \alpha |\bar{x}_a^{(i_c)(j_c+1)} - \bar{x}_a^{(i_c)(j_c)}|$, $h = \alpha |\bar{y}_a^{(i_c+1)(j_c)} - \bar{y}_a^{(i_c)(j_c)}|$ с центром в точке $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$, где i_c, j_c — индексы центральной строки и столбца сетки соответственно, $\alpha \in (0, 1]$ — вещественный параметр (в экспериментах использовалось значение $\alpha = 0,5$). Для фрагмента изображения I , содержащего искомый узел, и изображения-шаблона данного узла T вычисляются значения нормированной кросскорреляции R по формуле

$$R(u, v) = \frac{\sum_{u', v'} (T(u', v') I(u + u', v + v'))}{\sqrt{\sum_{u', v'} T(u', v')^2 \sum_{u', v'} I(u + u', v + v')^2}}.$$

Здесь (u, v) — всевозможные положения шаблона T относительно фрагмента I . По значениям u и v , при которых функция $R(u, v)$ достигает максимума, рассчитывается точное положение узла сетки $\bar{x}_c^{ij}, \bar{y}_c^{ij}$ на карте. Точность нахождения узла сетки зависит от схожести шаблона с фрагментом, поэтому шаблон формируется по фрагменту I с учётом толщины линий сетки и углов их наклона к координатным осям. Приближённое значение угла наклона φ горизонтальной линии к оси Ox в окрестности узла сетки i, j определяется как

$$\varphi = \arctg \frac{\bar{y}_a^{(i)(j+1)} - \bar{y}_a^{ij}}{\bar{x}_a^{(i)(j+1)} - \bar{x}_a^{ij}}.$$

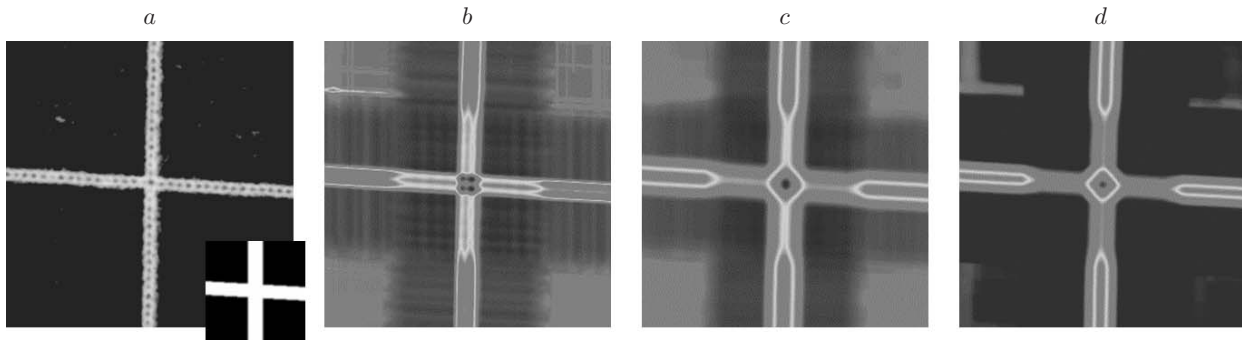


Рис. 4. Иллюстрация работы кросскорреляционного алгоритма: исходное изображение узла калибровочной сетки и его шаблона T (a); результаты применения кросскорреляционной функции с шаблонами, построенными с учётом только наклона линий, только толщины линий, наклона и толщины линий (b, c, d) соответственно

Толщина линий (вертикальной и горизонтальной) для каждого фрагмента находится с использованием модифицированной версии алгоритма, разработанного для обнаружения контуров структур, сформированных при лазерной микрообработке [13].

На рис. 4, a представлены изображения фрагмента реальной калибровочной карты объекта I , содержащего узел, и шаблона T , рассчитанного по указанному алгоритму. На рис. 4, $b-d$ приведены «тепловые карты» кросскорреляционной функции для данного фрагмента с различными шаблонами. Из рис. 4 видно, что наилучшие с практической точки зрения результаты получаются при учёте обоих параметров (см. рис. 4, d), поскольку в этом случае кросскорреляционная функция имеет единственный ярко выраженный максимум с наименьшей площадью пика.

Для проверки точности работы предложенного метода были синтезированы тестовые изображения сетки 33×33 линии с шириной от 10 до 30 пикселей и шагом 10^4 пикселей, повернутые на углы $0, -0,1, 0,5^\circ$, а также сетки с внесённым 10 %-ным искажением типа «бочка» и теми же углами поворота. Для найденных координат узлов среднеквадратическое отклонение от заданных значений не превысило 0,684 пикселя, а модуль максимальных значений ошибок — 2,5 пикселя.

Методика коррекции и подготовки данных для неё. Разрабатываемые в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН комплексы лазерной микрообработки используют комплиментарную схему построения системы сканирования для получения субмикронного разрешения и микронной точности на большом поле обработки (200×200 мм и более) [14]. В подобных системах быстрая развёртка лазерного луча в малом поле обработки происходит с помощью сканирующего модуля, а обработка всей поверхности достигается перемещением относительно модуля обрабатываемого материала посредством медленных (высокоинерционных) приводов. При этом динамическая коррекция позиции медленных приводов с помощью гальванометрических дефлекторов требует выполнения расчёта управляющих воздействий \hat{x}_s, \hat{y}_s в реальном времени с частотой до 1 МГц. Рассмотренные выше алгоритмы калибровки, основанные на полиномиальном приближении, требуют большого количества вычислений и соответственно аппаратных ресурсов. Для обеспечения нужной скорости вычислений при компактной аппаратной реализации в наших системах лазерной микрообработки используется следующий подход. Скорректированные управляющие воздействия \hat{x}_s, \hat{y}_s рассчитываются как сумма ($\hat{x}_s = x_s + \Delta x_s, \hat{y}_s = y_s + \Delta y_s$), а корректирующие значения $\Delta x_s, \Delta y_s$ вычисляются методом кусочно-планарной интерполяции [15] по таблице значений смещений $\Delta x_s^{ij}, \Delta y_s^{ij}$ в узлах сетки. Величины смещений

$\Delta x_s^{ij}, \Delta y_s^{ij}$ измеренных координат узлов тестовой сетки относительно заданных определяются как

$$\Delta x_s^{ij} = k_{sx}(\bar{x}_c^{ij} - x_c^{ij}), \quad \Delta y_s^{ij} = k_{sy}(\bar{y}_c^{ij} - y_c^{ij}),$$

где x_c^{ij}, y_c^{ij} — координаты узлов «идеальной сетки», k_{sx}, k_{sy} — коэффициенты пропорциональности для перехода между системами координат изображения и управляющих воздействий дефлекторов. Все вычисления могут быть выполнены с использованием только двоичной арифметики, что обеспечивает простую реализацию на ПЛИС. Недостатком такого метода является то, что для интерполяции применяется линейное приближение, однако преобразование D заведомо нелинейно, поэтому найденные $\Delta x_{s2}^{ij}, \Delta y_{s2}^{ij}$ по-прежнему могут превышать требуемые значения. Для уменьшения величин смещений предложено выполнение нескольких итераций рассмотренной выше процедуры коррекции. В этом случае в качестве приближения искомых управляющих воздействий \hat{x}_s, \hat{y}_s рассматриваются последовательности чисел $\hat{x}_{s,k}, \hat{y}_{s,k}$, определяемые рекуррентными соотношениями:

$$\hat{x}_{s,k} = \hat{x}_{s,(k-1)} + \Delta x_{s,k}; \quad \hat{y}_{s,k} = \hat{y}_{s,(k-1)} + \Delta y_{s,k}; \quad \hat{x}_{s,0} = x_s; \quad \hat{y}_{s,0} = y_s.$$

Экспериментальная проверка проводилась с использованием лабораторной системы фемтосекундной лазерной записи [16] и рабочей станции на основе фемтосекундного лазера [17] с комплиментарной системой сканирования. Основные технические характеристики рабочей станции:

- максимальная скорость обработки до 1000 мм/с;
- минимальная ширина гравированной линии 3 мкм;
- поля записи гальванометрической сканирующей системы 6×6 и 21×21 мм;
- общий размер зоны обработки $200 \times 200 \times 100$ мм (привод XY линейный, на воздушных направляющих, управляемая скорость перемещения от 1 до 100 мм/с, дискретность перемещения 50 нм, точность $\pm 0,6$ мкм, воспроизводимость $\pm 0,25$ мкм).

Результаты оценки смещений в узлах сетки размером 33×33 линии представлены в таблице (столбцы K_0 — исходные данные, $K_{и1}$ — после калибровки, σ_x и σ_y — средние квадратические величин $\Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}$ соответственно).

Видно, что применение одноступенчатой коррекции обеспечивает уменьшение $\Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}$ в несколько раз по сравнению с исходными значениями. Применение второй итерации коррекции ($K_{и2}$) для системы с полем записи 21×21 мм позволяет дополнительно уменьшить отклонения в 2 раза.

Для определения угла поворота системы координат сканирующего модуля относительно приводов горизонтального перемещения материала использовался тест в виде вертикальных и горизонтальных линий длиной, равной половине размера поля записи объекта. При этом тестовый объект перемещается относительно сканирующего модуля по

Оценки погрешности коррекции	Поле 6×6 мм		Поле 21×21 мм		
	K_0	$K_{и1}$	K_0	$K_{и1}$	$K_{и2}$
σ_x	3,8748	0,380	17,403	3,599	1,307
σ_y	1,6051	0,376	50,467	1,896	1,236
$\max_{i,j} \Delta x^{ij} $	16,0217	1,099	86,859	9,469	4,245
$\max_{i,j} \Delta y^{ij} $	3,2043	1,099	181,229	6,857	3,919

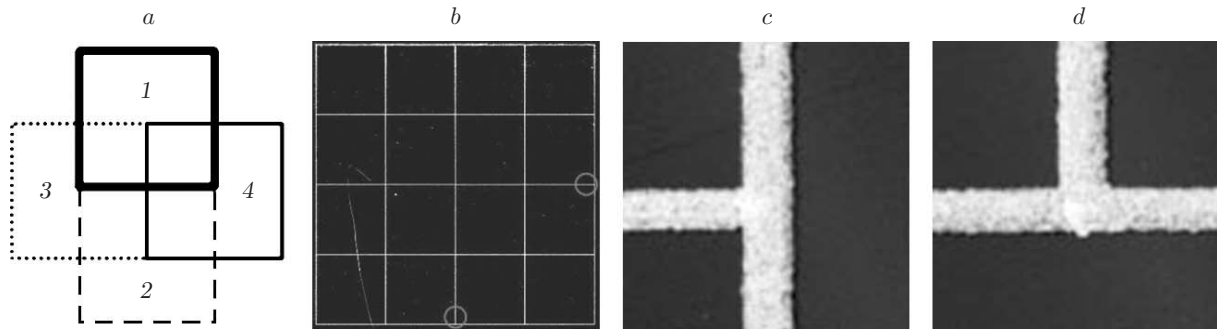


Рис. 5. Тест совмещения полей записи лазерной системы (ширина линии 5 мкм): *a* — схема выполнения теста; *b* — профилограмма; *c, d* — её увеличенные фрагменты

схеме, приведённой на рис. 5, *a*. Положение поля записи показано разным типом линий. В позициях 1 и 2 на поверхность тест-объекта наносятся вертикальные линии, в позициях 3 и 4 — горизонтальные. Совмещение систем координат по углу выполняется программным поворотом тестового изображения.

На рис. 5, *b* представлена профилограмма теста совмещения соседних полей размером 5 × 5 мм, увеличенные фрагменты (размером 50 мкм) вертикального и горизонтального стыков линий на краях поля записи сканирующего модуля показаны на рис. 5, *c, d* соответственно.

Данный тест также позволяет оценить ошибку стыковки соседних полей записи гальванометрического сканирующего модуля и качество его калибровки. Анализ изображения показывает визуальное отсутствие ступеньки между линиями и ошибку записи сканирующей системы менее 1 мкм на краях поля.

Заключение. Предложенные методы калибровки позволяют применять для записи калибровочных объектов материалы с «неидеальной» поверхностью, содержащей случайные дефекты в виде микроцарапин.

Метод поиска узлов сетки на основе двухступенчатой процедуры с использованием на втором этапе алгоритма кросскорреляции фрагментов карты объекта с шаблоном, учитывающим ширину линий сетки и угол их пересечения в узле, позволяет определить координату узла с ошибкой, примерно равной минимальной паспортной ошибке используемых дефлекторов.

Применение итерационной коррекции гальванометрической сканирующей системы методом кусочно-планарной интерполяции обеспечивает позиционирование лазерного луча с погрешностью $\delta \sim 10^{-5}$ [18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lightning™ II Scan Heads.** 2-Axis, Modular. Cambridge Technology. 2016. DS00005. URL: <http://www.cambridgetechnology.com/sites/default/files/Lightning%20II%20Scan%20Heads%20-%202-Axis%20Modular.pdf> (дата обращения: 10.01.2018).
2. **Scan System IntelliSCAN_{de} 2017.** URL: <http://www.scanlab.de/sites/default/files/PDF-Dateien/Data-Sheets/Scan-Systems/intelliSCAN-EN.pdf> (дата обращения: 5.11.2017).
3. **VIS-NIR Laser Scanning Lenses.** 55-S87-36T Diffraction Limited Performance F-Theta Scanning Lenses for Visible — NIR Wavelengths. Special Optics. 2015. URL: <http://specialoptics.com/products/laser-optics/laser-scanning-lenses/vis-nir-laser-scanning-lenses/> (дата обращения: 29.10.2017).

4. **Weisz J. R.** Software calibration of scan system distortions // Proc. SPIE. 1991. **1454**. P. 265–271.
5. **Tang Y.** Accuracy analysis and improvement for direct laser sintering // Proc. of the Seminar "Innovation in Manufacturing Systems and Technology". 2003. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/3898> (дата обращения: 7.10.2017).
6. **Manakov A., Seidel H.-P., Ihrke I.** A mathematical model and calibration procedure for galvanometric laser scanning systems // Proc. of the Vision, Modeling and Visualization Workshop. Berlin, Germany, 04–06 Oct., 2011. P. 207–204.
7. **Cui S., Zhu X., Wang W., Xie Y.** Calibration of a laser galvanometric scanning system by adapting a camera model // Appl. Opt. 2009. **48**, N 1. P. 2632–2637.
8. **Chen X., Li C., Wang Y., Yuan K.** An algorithm for correction of distortion of laser marking systems // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Control and Automation. Guangzhou, China, 30 May–1 June, 2007. P. 487–491.
9. **Stil Catalogue.** 2016. P. 7–11. URL: <http://ecatalog.stil-sensors.com/STIL-catalog.pdf> (дата обращения: 20.06.2018).
10. **De la Escalera A., Armingol J. M.** Automatic chessboard detection for intrinsic and extrinsic camera parameter calibration // Sensors. 2010. **10**, N 9. P. 2027–2044.
11. **Yimin L., Naiguang L., Xiaoping L., Peng S.** A novel approach to sub-pixel corner detection of the grid in camera calibration // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010). Taiyuan, China, 22–24 Oct., 2010. V5-18–V5-21. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5619403/?section=abstract> (дата обращения: 21.01.2018).
12. **Green J.** Locating tie-points on a grid // Conf. Paper of Old Dominion Univ. Bethlehem, USA, 1993. P. 104–108. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19940023403> (дата обращения: 21.01.2018).
13. **Бессмельцев В. П., Булушев Е. Д.** Быстрый алгоритм совмещения изображений для контроля качества лазерной микрообработки // Компьютерная оптика. 2014. **38**, № 2. С. 343–350.
14. **Бессмельцев В. П., Голошевский Н. В.** Система управления составными двухкоординатными сканаторами // Автометрия. 2007. **43**, № 1. С. 116–126.
15. **Бессмельцев В. П., Голошевский Н. В., Смирнов К. К.** Особенности управления лазерными системами микрообработки движущихся носителей // Автометрия. 2010. **46**, № 1. С. 98–106.
16. **Bessmeltsev V. P., Bulushev E. D., Goloshevsky N. V. et al.** High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser // Opt. Lasers Eng. 2016. **79**. P. 39–47.
17. **Баев С. Г., Бессмельцев В. П., Булушев Е. Д. и др.** Особенности технологии прецизионной фемтосекундной микрообработки оптических материалов // Сб. матер. Междунар. науч. конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь-2016». Новосибирск: СГУГиТ, 2016. Т. 2. С. 3–8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-tehnologii-pretsizionnoy-femtosekundnoy-mikroobrabotki-opticheskikh-materialov> (дата обращения: 05.01.2018).
18. **Кузнецов С. А., Генцелев А. Н., Баев С. Г.** Реализация фильтров высоких частот субтерагерцового диапазона с использованием высокоаспектных полимерных структур // Автометрия. 2017. **53**, № 1. С. 107–116.