15

Определение систематической ошибки измерений методом сдвига на интерферометре Физо

© Е.И. Глушков, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603087 Нижний Новгород, Россия
e-mail: eglushkov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 15 июня 2026 г.
В окончательной редакции 15 июня 2026 г.
Принято к публикации 15 июня 2026 г.

Предложена методика определения систематической ошибки измерений на интерферометре Физо методом сдвига вдоль апертуры интерферометра. Методика заключается в измерении перекрывающихся участков исследуемой оптической поверхности с последующим использованием значений восстановленной фазы (без разложения на полиномы) для составления и решения переопределенной системы линейных уравнений. Предложены два эксперимента по валидации методики. В первом эксперименте одна и та же поверхность измеряется в прямом и повернутом на 180° положениях. Во втором эксперименте исследуются две различные поверхности. По разработанной методике экспериментально исследованы два образца: плавленый кварц габаритами 25×70 mm и монокристаллический кремний габаритами 25×200 mm на интерферометре Zygo Verifire с апертурой 4 дюйма. По разработанной методике удалось провести измерение поверхности с ошибкой формы $\sim \lambda/1000$. Продемонстрировано, что учет систематической ошибки при сшивке субапертур позволяет определить направление стрелы прогиба исследуемой поверхности.

Ключевые слова: интерферометр Физо, высококогерентная интерферометрия, абсолютные измерения, форма поверхности.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63635.209-26

Введение

В оптике рентгеновского диапазона предъявляются высокие требования к точности формы поверхности. Согласно критерию Марешаля, волновой фронт является дифракционно-ограниченным, когда $\mathrm{STD}_{wave\,front} \leq \lambda/14$, где λ — рабочая длина волны, STD (СКО) — среднеквадратическое отклонение, что накладывает ограничения на форму поверхности $\mathrm{STD}_{form} \leq \lambda/28 \sin\theta$, где φ — угол скольжения (везде в тексте СКО будет считаться относительно ближайшей плоскости или прямой). Станция 1-1 „Микрофокус“ синхротрона „СКИФ“ работает с синхротронным излучением (СИ) в диапазоне $0.04-0.12$ nm ($10-30$ keV) при углах скольжения $0.5-1°$. С точки зрения критерия Марешаля, это накладывает ограничения на СКО формы поверхности 0.5 nm для отражения излучения на длине волны 0.12 nm под углом скольжения 0.5°. Для проекционных объективов, работающих по схеме Шварцшильда при нормальном падении рентгеновского излучения, для „водного окна“ ($\lambda = 2.8-4.3$ nm) для биологических исследований живых клеток ограничение на форму составляет ~ 0.1 nm.

Одним из традиционных приборов для измерения ошибок формы поверхности оптических элементов является интерферометр Физо. Это интерферометр с высокой пространственной когерентностью ($\lambda = 632.8$ nm) с апертурой порядка 4″ (наиболее распространенная величина), позволяющий за одно измерение получить двумерную карту аберраций волнового фронта отраженного излучения. Для измерения плоских зеркал в интерферометре Физо используется плоская эталонная поверхность, которая является одним из источников систематических ошибок измерений. Широко распространенные коммерчески доступные эталонные поверхности обладают точностью формы по параметру PV (Peak-to-Valley) $\lambda/20 \approx 30$ nm (RMS ≈ 5 nm) и в лучшем случае $\lambda/50 \approx 13$ nm (RMS ≈ 2 nm). Отсюда видно, что точности эталонных поверхностей недостаточно для оценки формы рентгеновских зеркал прямым измерением. Более того, для измерения крупногабаритных (больше апертуры интерферометра) зеркал применяется методика сшивки (объединение перекрывающихся снимков поверхности по информации, содержащейся в перекрывающихся областях) субапертур (измеряемый участок исследуемой поверхности, габариты которого могут быть меньше габаритов самой поверхности), которая приводит к накоплению систематической ошибки [1,2]. Таким образом, необходима методика определения систематической ошибки измерений с последующим ее учетом в сшивке.

Методы абсолютного измерения включают метод жидкой плоскости [3], метод псевдосдвига [4], метод трех плоскостей и его варианты [5]. Традиционный метод трех плоскостей основан на взаимных измерениях трех плоскостей с использованием определенных приближений и аппроксимаций полиномами с заранее определенной максимальной степенью для получения

абсолютной формы измеряемой поверхности, что ограничивает точность восстановления формы полиномами высших порядков и сингулярными ошибками формы. Существенным недостатком метода трех плоскостей является необходимость использования трех дорогостоящих эталонных плоскостей. Современные методы проведения абсолютных измерений основаны на анализе информации, содержащейся в восстановленной фазе, и не используют аппроксимацию поверхности полиномами, что обеспечивает высокое пространственное разрешение измерений.

В настоящей работе для определения систематической ошибки измерений предлагается провести серию измерений перекрывающихся участков исследуемой оптической поверхности с шагом, кратным шагу пространственной выборки матрицы детектора интерферометра, с последующим использованием значений восстановленной фазы для решения переопределенной системы линейных уравнений. Далее в тексте настоящей работы под термином „размер пикселя“ будут подразумеваться габариты участка исследуемой поверхности, соответствующие одному пикселю матрицы.

1. Математическая модель эксперимента

Результат измерения формы поверхности (восстановленная по интерферограмме фаза) оптического элемента под номером i представим в виде

$$M_i(x, y) = S_i(x, y) + R(x, y), \tag{1}$$

где $S_i(x, y)$ — форма поверхности, а $R(x, y)$ соответствует систематической ошибке измерений (переменные x и y соответствуют пикселям и являются целыми числами). Систематическую ошибку измерений считаем одинаковой для всех измерений серии. Между измерениями исследуемая поверхность сдвигается вдоль оси X на целое число пикселей h. Матрицы S_i и R имеют одинаковый размер $m \times n$, где m и n — произвольные натуральные числа. Матрица M при N-измерениях будет иметь размер $m \times \big(n + h(N-1)\big)$.

Результат N-измерений можно представить в виде системы линейных уравнений

$$\begin{cases} M_1(x + 0h, y) = S_1(x + 0h, y) + R(x, y), \\ M_2(x + 1h, y) = S_2(x + 1h, y) + R(x, y), \\ \dots \\ M_N\big(x + (N-1)h, y\big) = S_N\big(x + (N-1)h, y\big) + R(x, y). \end{cases} \tag{2}$$

Полученную систему уравнений можно переписать в виде $A\mathbf{p} = \mathbf{b}$, где $\mathbf{p} = [\mathbf{R}, \mathbf{S}]^T$,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ \dots \\ r_{1n} \\ r_{21} \\ \dots \\ r_{mn} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} \\ s_{12} \\ \dots \\ s_{1,n} + h(N-1) \\ s_{21} \\ \dots \\ s_{m,n} + h(N-1) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 \\ m_{12}^1 \\ \dots \\ m_{mn}^N \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Система (3) содержит $2mn + (N-1)mh$ неизвестных и mnN-уравнений. Матрица A соответственно содержит mnN-строк и $2mn + (N-1)mh$-столбцов. В каждой строке матрицы A для i-го кадра ненулевые элементы содержатся на позициях $A\big((i-1)mn + j,\ (i-1)mn + j\big)$ и на позициях $A\big((i-1)mn + j, mn + (i-1)h + \big(n + (N-1)h\big)\big[j-1/n\big] + (j\, mod\, n)\big)$, где j меняется от 1 до mn. Вектор $\mathbf{b}$ составлен из матричных элементов m_{jk}^i восстановленной фазы M_i из уравнения (1). Верхний индекс указывает на номер субапертуры, а нижние индексы соответствуют индексам матричных элементов участка эталонной поверхности, на котором были проведены измерения. Полученная система решается методом наименьших квадратов и решение имеет вид $\mathbf{p} = (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{b}$.

На рис. 1 слева представлена упрощенная схема измерений для участка эталонной поверхности размером 2×2 пикселя и участка исследуемой поверхности размером 2×4. Смещение осуществляется на 1 пиксель.

Видно, что матрица коэффициентов на рис. 1 справа является разреженной. Это обстоятельство полезно использовать при решении систем с большими размерностями, пользуясь формализмом разреженных матриц, заключающимся в оперировании индексами и значениями только ненулевых элементов при выполнении математических операций, что существенно ускоряет расчеты и уменьшает объем используемой памяти.

2. Численный эксперимент

Исследуем численно влияние систематической ошибки на результаты прямых измерений и измерений крупногабаритных зеркал методом сшивки субапертур.

Рассмотрим модельную поверхность (рис. 2), соответствующую эталонной, имеющей ошибку формы $\lambda/20$ ($\lambda = 632.8$ nm) и характерное СКО ~ 5 nm. Диаметр поверхности равен 100 mm, а в соответствие ей поставим матрицу размером 1200×1200 (1 пиксель ≈ 0.083 mm). Измерения по разработанной методике, про которые пойдет речь в экспериментальной части работы, планируются с двукратным оптическим увеличением интерферометра на участке эталона 500×1000 пикселей (при этом, забегая вперед, отметим, что размер измеренной поверхности будет равен 500×1400 пикселей и размер

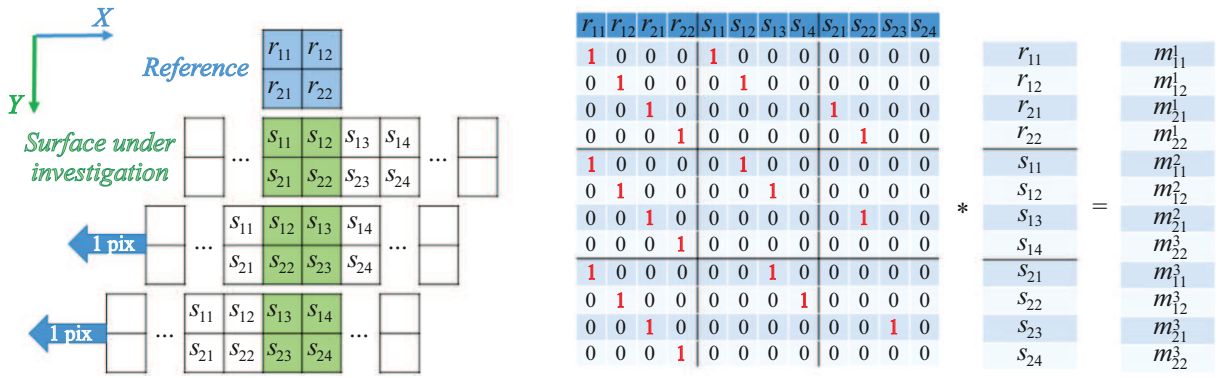

Рис. 1. Слева — упрощенный пример схемы измерений по определению систематической ошибки измерений методом сдвига. Продольный размер исследуемой поверхности подразумевается не менее размера участка эталонной поверхности. Сдвиг осуществляется на 1 пиксель. Справа — соответствующее матричное уравнение, в котором величины m^i_{jk} (m^i_{jk} — матричные элементы восстановленной фазы матрицы M_i из уравнения (1)) считаются известными из измерений.

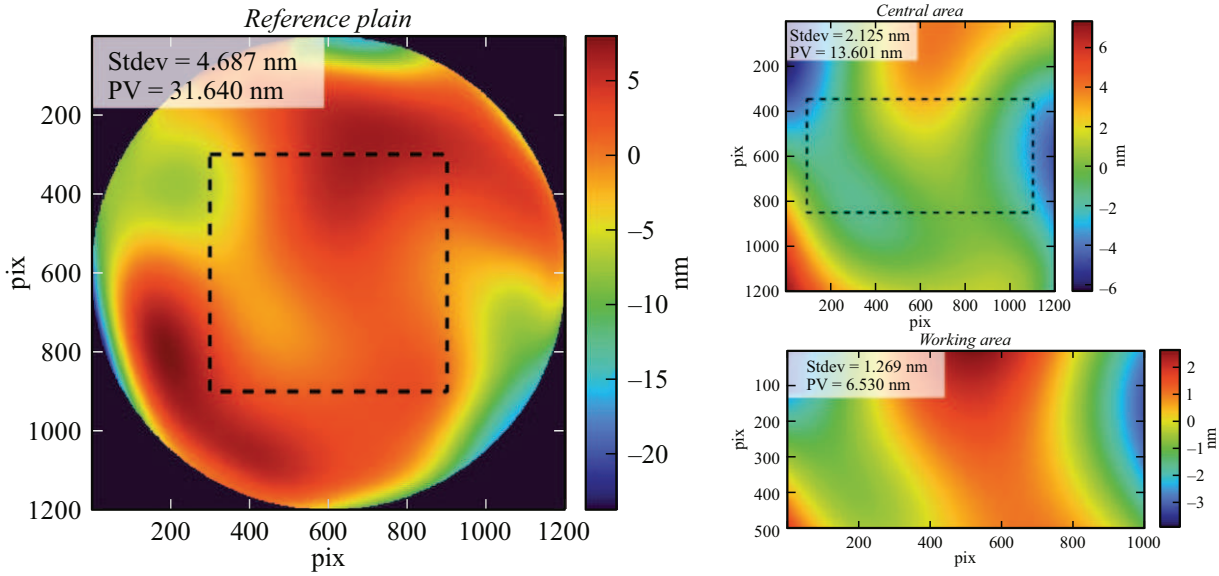

Рис. 2. Слева — модельная поверхность эталонной поверхности с точностью формы PV $\lambda/20$ и СКО 4.69 nm. Справа сверху — центральная область эталона, соответствующая измерению с увеличением $\times 2$. Справа снизу — рабочая область эталона при увеличении $\times 2$, которая будет исследоваться в дальнейшем экспериментально.

пикселя на эталоне совпадает с размером пикселя на детали). В данной области модельный эталон имеет СКО 1.27 nm и PV 6.53 nm (рис. 2).

На рис. 3 слева представлена модельная исследуемая поверхность, а справа — результат ее измерения методом сшивки [6] в предположении, что область перекрытия между кадрами составляет 90 % [7] (шаг сшивки — 20 пикселей) и каждый кадр содержит одинаковую систематическую ошибку (в рассматриваемой модели она равносильна форме эталонной поверхности в рабочей области). Видно, что форма сшитой поверхности отличается от модельной как качественно, так и количественно (СКО 11.91 nm, PV 48.33 nm). При попытке обработки (например, ионно-пучковой [8]) поверхности по сшитой карте измерительная ошибка может привести к ошибке обработки детали, что будет ограничивать предельно достижимую снизу ошибку формы.

Перейдем к исследованию характеристик рассматриваемого метода определения систематической ошибки. Рассмотрим влияние величины шага в пикселях на остаточную ошибку (под остаточной ошибкой подразумевается разность систематической ошибки, определенной математически и заданной в модели) определения систематической ошибки и остаточную ошибку определения формы исследуемой поверхности. Для каждой величины сдвига их число выбирается максимально возможным. Результат вычислений по методике, описанной в разд. 1, представлен на рис. 4 слева. Из графика видна монотонная зависимость величины остаточной ошибки от величины шага. Остаточная ошибка при этом меньше 1 nm и минимальна при шаге 1 пиксель.

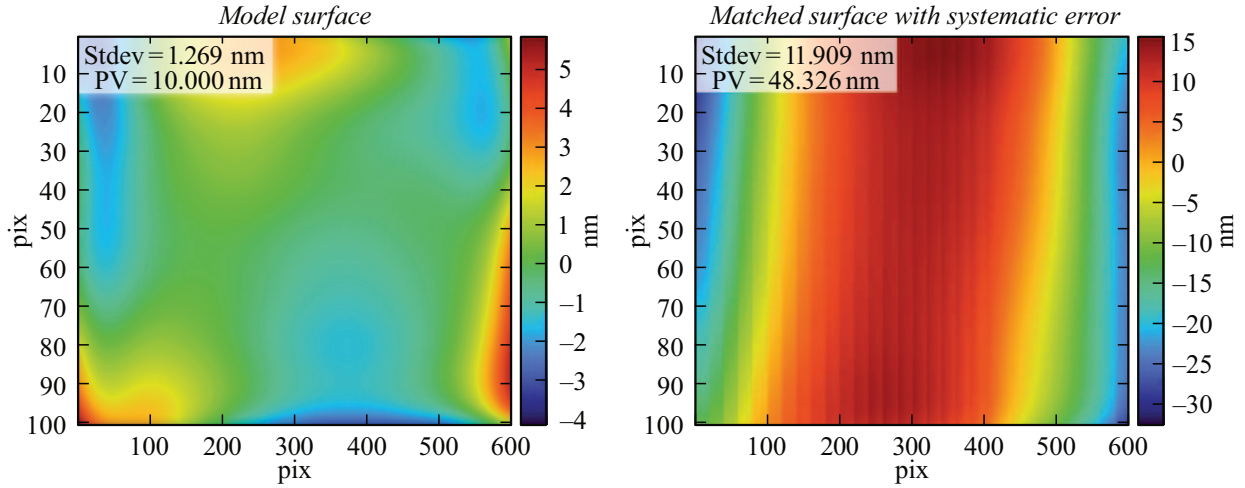

Рис. 3. Слева — модельная исследуемая поверхность. Справа — сшивка с шагом 20 пикселей в случае, когда каждый кадр содержит одинаковую систематическую ошибку.

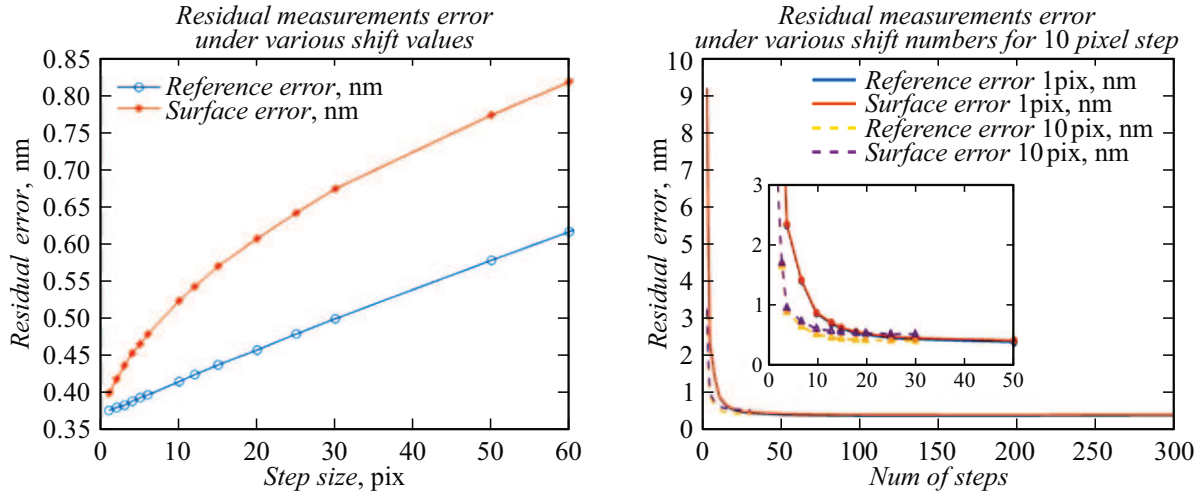

Рис. 4. Зависимости среднеквадратических ошибок измерений в зависимости от величины шага (слева) и от числа шагов для величин шага 1 и 10 пикселей (справа). Расчет выполнен в присутствии гауссова пиксельного шума с отклонением 1 nm.

Далее рассмотрим влияние числа сдвигов при фиксированных величинах сдвига, равных 1 и 10 пикселей. Из рис. 4 справа видно, что при величине шага в 1 пиксель остаточная ошибка сначала быстро убывает, и при количестве сдвигов около 10 выходит на асимптотику с тенденцией незначительного роста ошибки, что может говорить о плохой обусловленности системы уравнений при большем числе сдвигов.

При величине шага в 10 пикселей такого эффекта не наблюдается. Общим для обеих величин шага является то, что, начиная с определенного количества сдвигов, скорость уменьшения остаточной ошибки существенно снижается. При количестве сдвигов порядка 30 остаточная ошибка не превышает 0.5 nm и перестает существенно снижаться при дальнейшем увеличении числа сдвигов.

3. Схема измерительной системы

На рис. 5 сверху представлен измерительный стенд, созданный в ИФМ РАН для проведения высокоточных измерений формы поверхности зеркал [7]. В качестве интерферометра Физо используется интерферометр Zygo Verifire ($\lambda = 632.8$ nm) с плоской эталонной поверхностью ($4''$, PV $< \lambda/20$). Волновой фронт, отраженный от эталонной поверхности, является опорным. Исследуемая поверхность располагается на системе подвижек (компания Standa, Литва): линейная (8MT160-300) X-подвижка *1* для перемещения исследуемой поверхности вдоль апертуры интерферометра, наклонная (8MR151) ϑY-подвижка *2* и наклонная (8MG00V-80) ϑX-подвижка *3* для ориентации исследуемой поверхности параллельно эталонной. Их основные технические характеристики можно найти на сайте производителя [9].

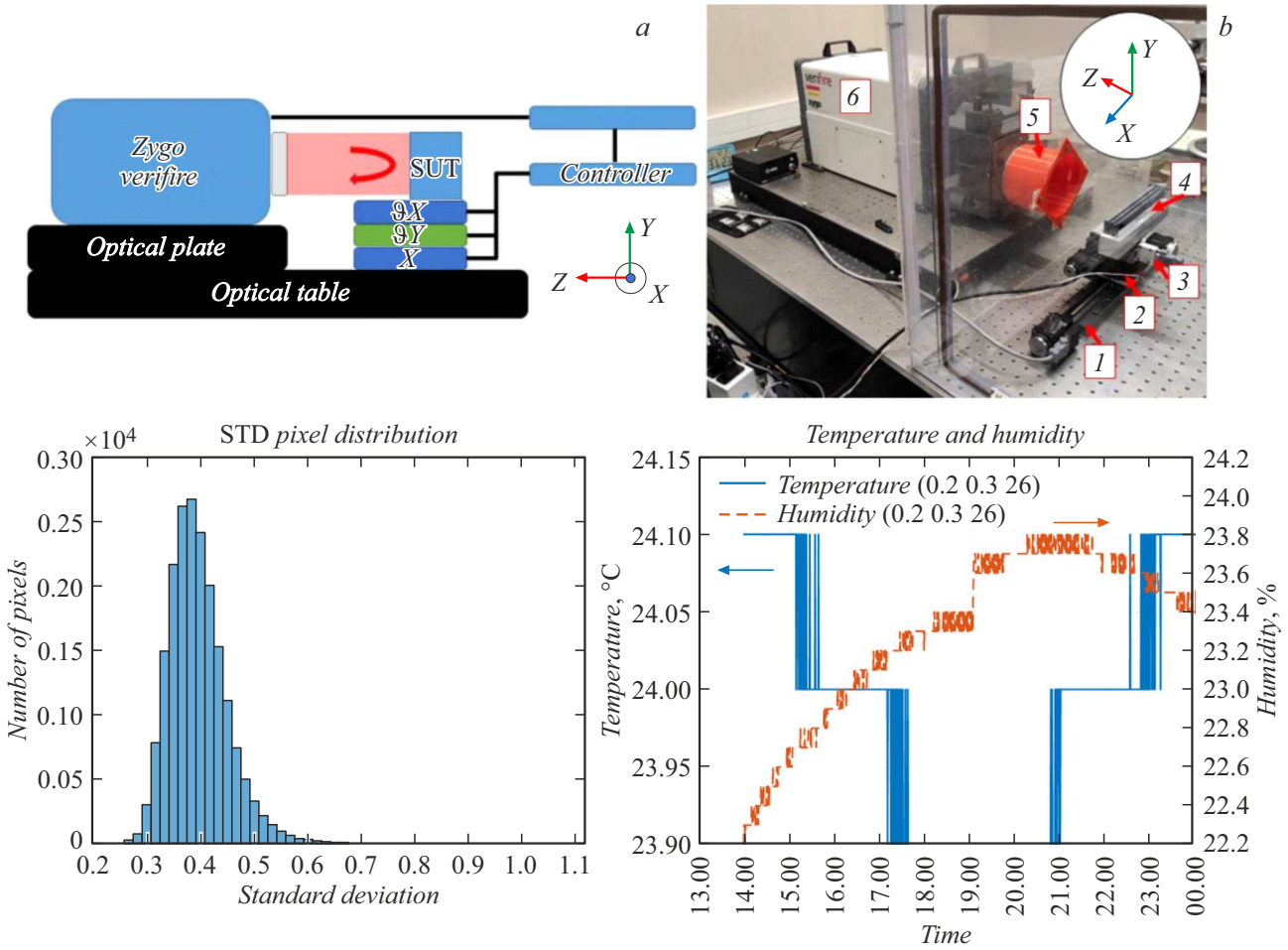

Рис. 5. Сверху — схема и фото измерительного стенда: *1* — линейная X-подвижка; *2* — наклонная ϑY-подвижка; *3* — наклонная ϑX-подвижка; *4* — исследуемая поверхность; *5* — защитный экран для изоляции от внешних потоков воздуха, соединяющий короб и эталон интерферометра; *6* — интерферометр Физо. Слева снизу — СКО значений восстановленной фазы в пикселях маски (используемая в измерениях часть эталона). Среднее значение отклонения составляет 0.38 nm. Справа внизу — температура и влажность в помещении в день проведения измерений (датчики расположены в коробе).

Исследуемая поверхность *4* с системой подвижек расположены в коробе, изолирующем систему от внешних воздушных потоков и пыли. Дополнительно короб соединен с интерферометром защитным экраном *5*. Измерительная система расположена на оптическом столе, стоящем на бетонных плитах здания. Измерения полностью автоматизированы.

Минимальный шаг линейного перемещения составляет 2.5 μm. Для ориентации исследуемой поверхности параллельно эталону наклонные подвижки работают в микрошаговом режиме с делением шага 1 : 16. С заданными параметрами при условии отработки шаговыми двигателем всех шагов разрешение по ϑY составляет 9.8 μrad, а по ϑX — 3.3 μrad. В рамках эксперимента, который будет описан в настоящей работе, с использованием области эталона габаритами 25 × 51.6 mm указанное разрешение означает, что мы сможем проводить юстировку с разрешением 1.6 полосы по ϑY и 0.26 полосы по ϑX. Формально этого достаточно для проведения измерений в состоянии с менее чем одной интерференционной полосой. Реальная система может обладать люфтами механики, не отрабатывать шаги или отрабатывать больше шагов, чем нужно. Наша автоматизированная система учитывает эти нюансы, и ее способность к ориентации исследуемой поверхности параллельно эталонной представлена на рис. 6. Для этих исследований была проведена серия из 300 испытаний по ориентации исследуемой плоской поверхности из различных положений параллельно эталонной поверхности. Остаточные углы юстировки определялись из линейных коэффициентов при аппроксимации восстановленной фазы плоскостью. Из графиков видно, что система позволяет проводить измерения в среднем с 0.004 и 0.008 полосами по ϑY и ϑX соответственно и обладает разрешением 0.388 и 0.151 полос по ϑY и ϑX соответственно, что превышает расчетные характеристики.

Повторяемость однократных измерений на стенде имеет СКО 0.015 nm (под повторяемостью имеется вви-

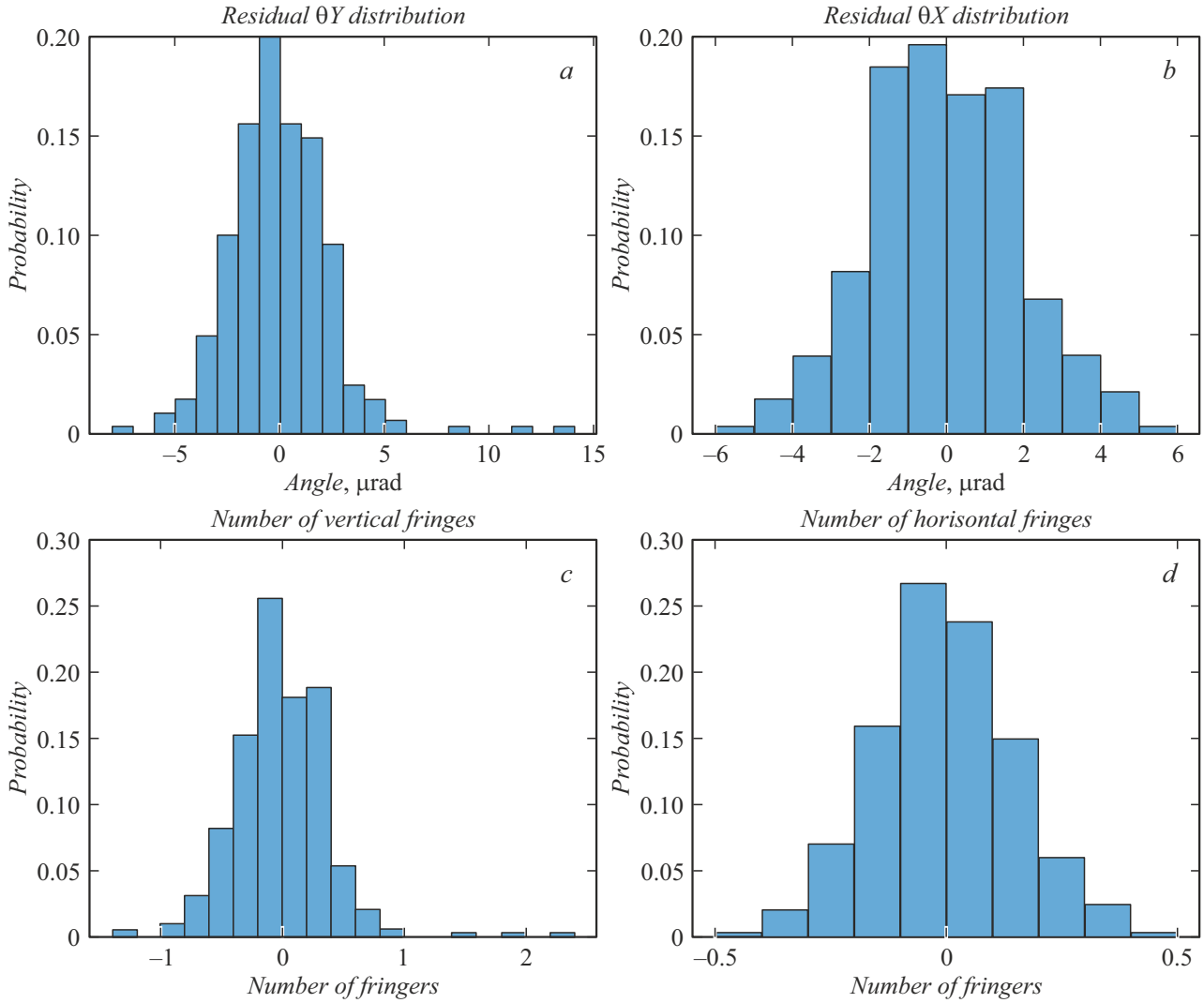

Рис. 6. Распределение остаточных углов в результате работы алгоритма: a — по направлению θY, $\mu = -0.05\,\mu$rad, $\sigma = 2.38\,\mu$rad; b — по направлению θX, $\mu = -0.06\,\mu$rad, $\sigma = 1.91\,\mu$rad. Соответствующее угловым распределение остаточных полос в результате работы алгоритма: a — по направлению θY (вертикальные полосы), $\mu = -0.008$ полосы, $\sigma = 0.388$ полосы; b — по направлению θX (горизонтальные полосы), $\mu = -0.004$ полосы, $\sigma = 0.151$ полосы. Знак полос соответствует ориентации исследуемой поверхности относительно эталонной.

ду СКО измеренных значений отклонений восстановленной фазы от ближайшей плоскости). СКО значений восстановленной фазы в пикселях маски (используемая в измерениях часть эталона (рис. 5 слева снизу) в среднем равно 0.38 nm для каждого пикселя, что лучше, чем предполагалось в моделировании (1 nm).

Из-за того, что в помещении отсутствует поддержание климатических условий, режимы измерений выбирались такими, чтобы выполнить их за один день с целью минимизации влияния дрейфа температуры и относительной влажности [10,11] (рис. 5 справа снизу), которые составили 0.2 °C и 1.6 % соответственно.

4. Калибровка размера пикселя

Так как методика определения систематической ошибки использует величины шагов, кратные размеру пикселя, перед проведением измерений необходимо определить размер пикселя.

Калибровку размера пикселя мы проводим с использованием плоской подложки (подойдет исследуемая в эксперименте поверхность) и линейной подвижки, которая перемещает исследуемую поверхность вдоль апертуры интерферометра.

Калибровка проводится в 6 этапов:

1) проводится измерение формы исследуемой поверхности; край измеренной детали помечается на экране программного обеспечения интерферометра;

2) осуществляем шаги на минимальную величину ($2.5\,\mu$m) до тех пор, пока край измеренной детали не пересечет метку;

3) переезжаем на максимальное расстояние L (в нашем случае 40 mm), которое позволяет апертура интерферометра при выбранном увеличении L;

4) проводим измерение и делаем новую метку для отслеживаемого края;

5) осуществляем шаги на минимальную величину с подсчетом их числа N, пока край детали не пересчет новую метку;

6) расстояние между метками $L + N \cdot 0.0025\,\text{mm}$ используем для калибровки.

Для определения повторяемости калибровки мы выполнили ее 10 раз подряд и каждый раз получали, что 926 пикселям соответствует перемещение на 40.0025 mm, чему соответствует размер пикселя $43.1992\,\mu\text{m}$.

При таком подходе на погрешность определения размера пикселя влияют несколько факторов. Во-первых, инструментальная погрешность позиционирования. Используемая линейная подвижка обладает нониусной шкалой с 200 делениями, поэтому инструментальная погрешность составляет $0.0025\,\text{mm}/2 = 0.00125\,\text{mm}$, а погрешность определения расстояния по ней $\Delta S = \sqrt{0.00125^2 + 0.00125^2} = 0.00177\,\text{mm}$. Во-вторых, погрешность совмещения края детали с краем пикселя составляет 0.5 пикселей. Значит, относительная погрешность определения размера пикселя составляет $\sqrt{(0.00177/40.0025)^2 + (0.5/926)^2} \approx 0.0328\,\%$. А абсолютная величина погрешности равна $0.0142\,\mu\text{m}$.

Поскольку дальнейшая методика требует задания величины сдвига, кратной целому числу пикселей, мы округляем размер пикселя до $43\,\mu\text{m}$ (при увеличении $\times 2$). При этом погрешность округления составляет $0.5\,\mu\text{m}$, что на два порядка превышает погрешность калибровки. Однако такая величина ошибки определения размера пикселя является допустимой, так как моделирование показывает, что соответствующая остаточная ошибка определения систематической ошибки и формы поверхности не превосходит 1 nm по СКО.

5. Определение систематической ошибки измерений методом сдвига

Определим систематическую ошибку измерений, используя прямоугольный оптический элемент из плавленого кварца габаритами $25 \times 70\,\text{mm}$. Исследуемая поверхность лежит на торце под собственным весом без использования дополнительного крепления (рис. 4). Далее выберем величину шага сдвига. Он должен удовлетворять следующим критериям:

1) делиться нацело на размер пикселя, который при выбранном оптическом увеличении составляет $43\,\mu\text{m}$;

2) делиться нацело на величину одного шага линейной подвижки, который в нашей системе составляет $2.5\,\mu\text{m}$;

3) количество возможных измерений должно быть не менее 30, чтобы достигнуть модельного минимума остаточной ошибки;

4) количество измерений не должно превышать 60 для возможности проведения минимум пяти серий измерений в один день.

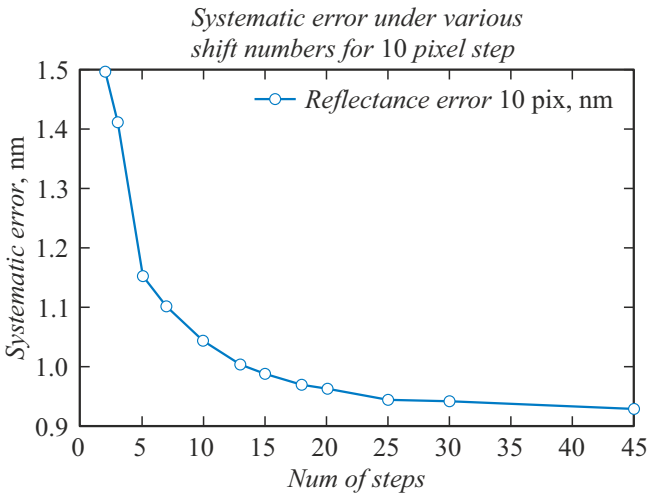

Рис. 7. Зависимость величины систематической ошибки измерений от числа измерений, участвующих в ее определении.

Данным критериям удовлетворяет шаг $430\,\mu\text{m}$ (10 пикселей или 172 шага). Число измерений ограничим 45, чтобы исключить границы детали из рассмотрения. Эффективная измеренная область будет составлять $21.50 \times 61.92\,\text{mm}$.

Измерения проводятся на автоматизированном стенде [12] следующим образом:

1) исследуемая поверхность с помощью наклонных подвижек ориентируется параллельно эталонной поверхности интерферометра (алгоритм выставления „нуля полос“ в стенде позволяет делать это без участия оператора);

2) ждем 10 s перед измерением для приведения исследуемой поверхности в равновесие;

3) проводим измерение с усреднением по 20 кадрам;

4) смещаемся линейно на $430\,\mu\text{m}$;

5) повторяем действия 1–4, пока не получим набор из 45 результатов измерений.

На рис. 7 представлена величина среднеквадратического отклонения систематической ошибки в зависимости от числа использованных кадров для ее определения. Из графика видно, что увеличение числа шагов от 20 до 25 СКО меняется на 0.012 nm. А при увеличении от 25 до 45 — на 0.016 nm.

На рис. 8 сверху представлены типичные результаты по восстановлению систематической ошибки измерений и формы детали в процессе определения повторяемости измерений. Отметим, что восстановленное СКО формы детали составило 0.571 nm, что составляет $\sim \lambda/1000$. СКО систематической ошибки составило 0.93 nm.

Из рис. 9 видно, что кривые центральных сечений (под центральным сечением понимаются значения, содержащиеся в строке по середине соответствующей матрицы) систематических ошибок хорошо ложатся друг на друга, и СКО центрального сечения систематических ошибок друг от друга и восстановленной исследуемой поверхно-

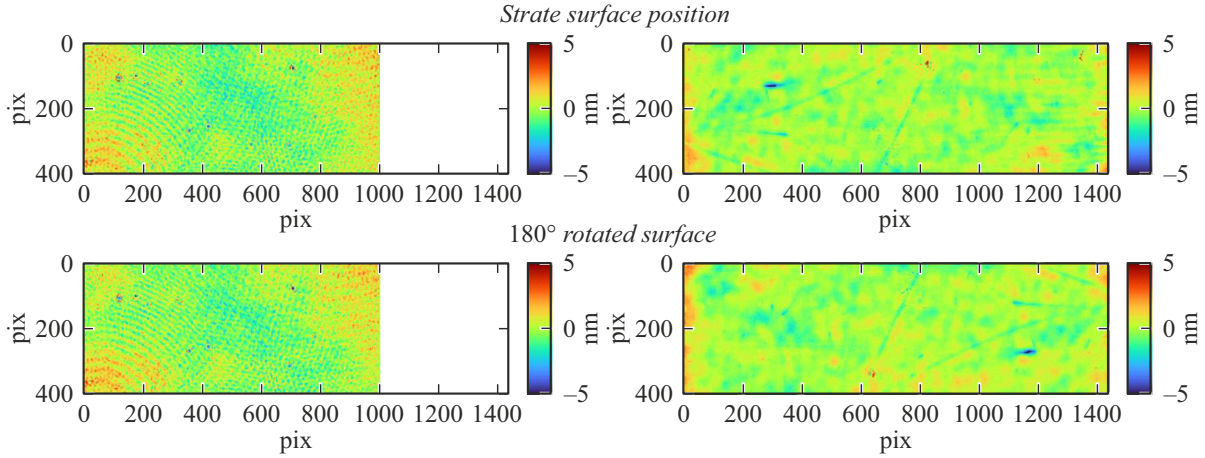

Рис. 8. Сверху — результат обработки измерений кварцевой детали в прямом положении, снизу — в повернутом на 180°. Слева — систематические ошибки измерений. Справа — форма детали. Видно, что в результате поворота систематическая ошибка качественно не изменилась, а форма детали повернулась на 180°. Параметры: слева сверху СКО = 0.913 nm, PV = 10.648 nm; слева снизу СКО = 0.888 nm, PV = 11.311 nm; справа сверху СКО = 0.571 nm, PV = 12.346 nm; справа снизу СКО = 0.584 nm, PV = 10.022 nm.

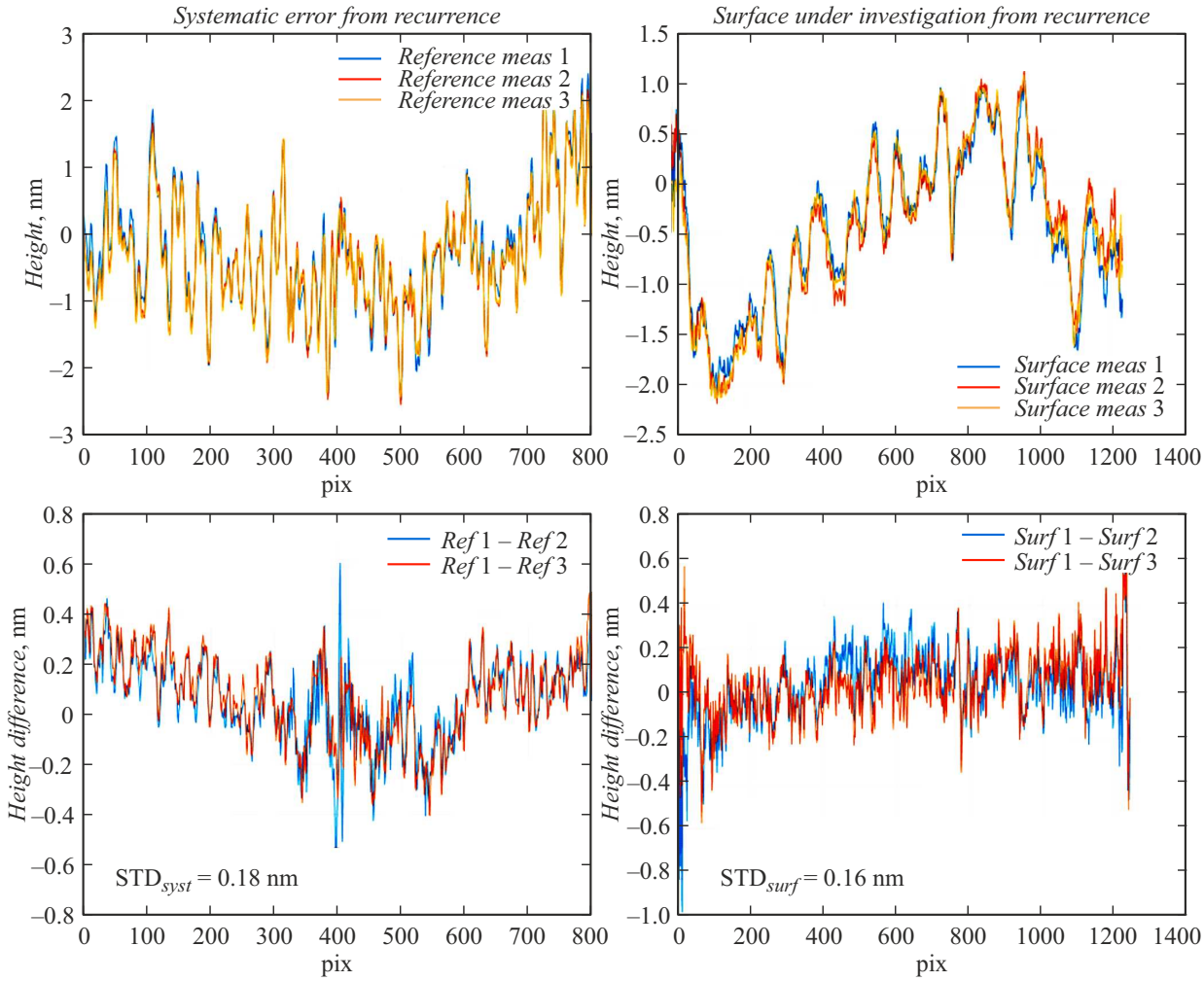

Рис. 9. Центральные сечения систематических ошибок (сверху слева) и формы исследуемой поверхности (сверху справа), полученные в серии из трех измерений кварцевой детали в прямом положении. Снизу слева и снизу справа — разности центральных сечений систематических ошибок и исследуемой поверхности соответственно. Повторяемость измерений систематической ошибки и исследуемой поверхности не превышает 0.2 nm для центрального сечения.

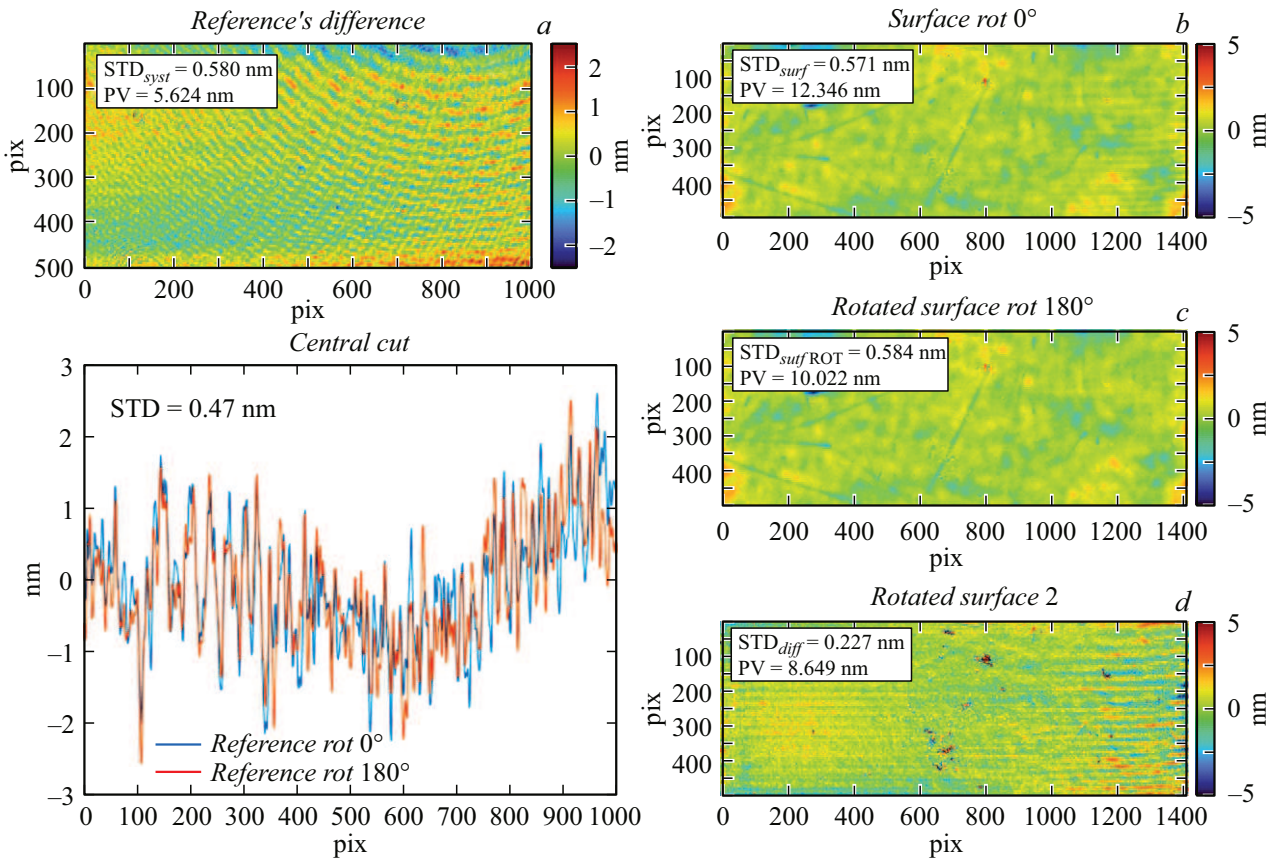

Рис. 10. *a* сверху — разница систематических ошибок, определенных при измерении кварцевой подложки в прямом и перевернутом состояниях; снизу — центральные сечения систематических ошибок. СКО разности центральных сечений систематических ошибок составляет 0.47 nm. *b, c* — представлена форма исследуемой поверхности, определенная в прямом и повернутом на 180° положениях соответственно (*c*) изображение дополнительно перевернуто по сравнению с рис. 7. *d* — представлена разность поверхностей на рисунках *b* и *c*.

сти друг от друга не превышают 0.2 nm, что позволяет говорить о субнанометровой повторяемости измерений.

6. Валидация измерений переворотом детали

Мы проводили валидацию описываемой методики путем измерения исследуемой поверхности в двух состояниях: прямом и повернутом на 180°. На рис. 8 приведены восстановленные из экспериментальных данных карты систематической ошибки и поверхности в прямом и перевернутом состояниях. А на рис. 10 представлена разница определенных систематических ошибок и исследуемой поверхности. СКО разности систематических ошибок во всей исследуемой области в прямом и повернутом состояниях составило 0.58 nm, а СКО разности исследуемой поверхности — 0.23 nm.

Особенности на картах систематических ошибок качественно повторяют друг друга в прямом и перевернутом положениях. В то же время дефекты и особенности исследуемой поверхности перевернулись при перевороте детали.

7. Валидация разными участками одной поверхности

Второй возможный способ валидации измерений заключается в использовании разных поверхностей.

В этом эксперименте в качестве оптического элемента мы используем подложку из монокристаллического кремния габаритами 25×200 mm. Суть эксперимента заключается в сравнении систематических ошибок, полученных на разных участках детали, не имеющих общих областей, что, в некотором смысле, равносильно проведению эксперимента с разными оптическими элементами.

В эксперименте одному пикселю соответствовали 58 μm на исследуемой поверхности (иное увеличение по сравнению с экспериментом с кварцем).

Кремниевая подложка была измерена в двух непересекающихся областях с шагом 10 пикселей (0.58 mm). В каждой области были измерены по 30 субапертур. Результат восстановления систематической ошибки можно наблюдать на рис. 10.

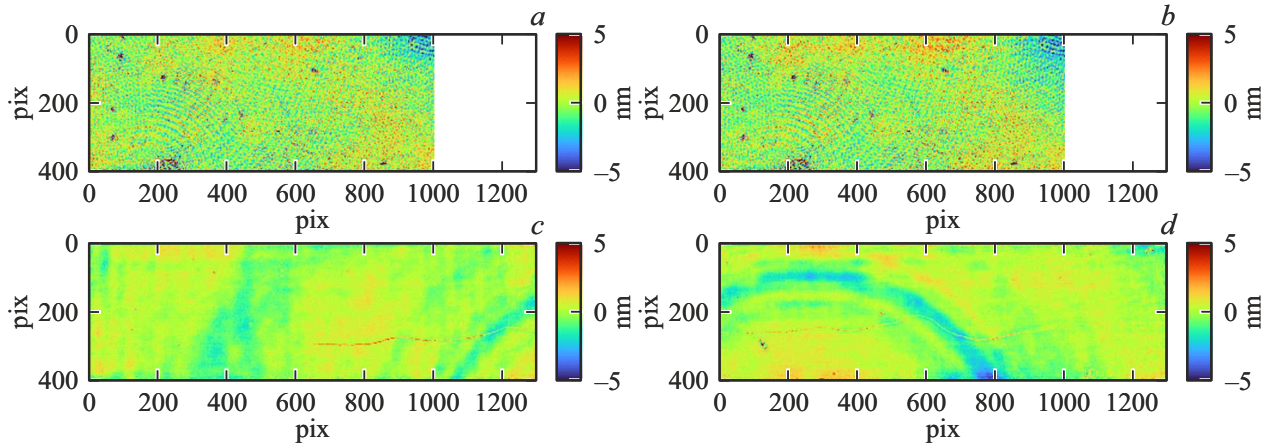

Рис. 11. *a, b* — систематические ошибки измерений на двух половинах исследуемой поверхности; *c, d* — полученные из измерений формы двух соответствующих половин исследуемой поверхности. Видно, что систематические ошибки измерений качественно похожи при явных отличиях в измеренных участках детали. Параметры: *a* — СКО = 1.372 nm, PV = 17.642 nm; *b* — СКО = 1.399 nm, PV = 17.974 nm; *c* — СКО = 0.593 nm, PV = 11.65 nm; *d* — СКО = 0.755 nm, PV = 32.034 nm.

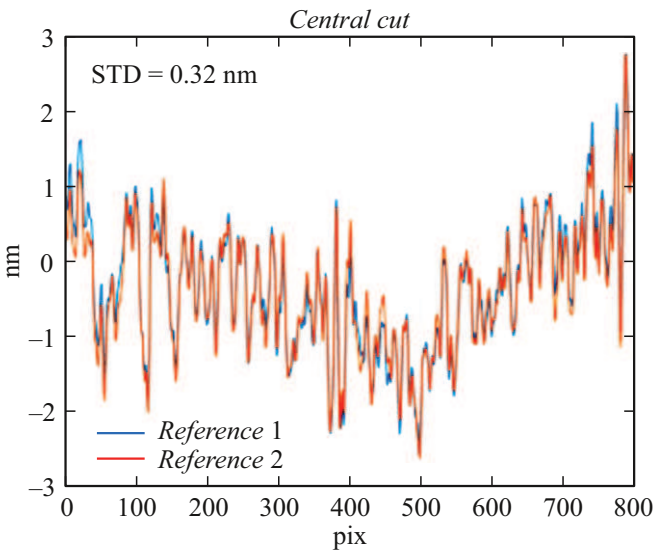

Рис. 12. Сравнение центральных сечений восстановленных систематических ошибок. СКО разности сечений составляет 0.32 nm.

На рис. 11 качественно видно, что систематическая ошибка схожа для обеих половин детали. На рис. 12 приведены центральные сечения по X восстановленных систематических ошибок, а СКО разности центральных сечений систематической ошибки составляет 0.32 nm.

8. Учет систематической ошибки измерений при сшивке субапертур

Далее было исследовано влияние систематической ошибки на сшивку измеренных субапертур кремния с шагом 50 пикселей, при котором перекрытие субапертур составляет 95%. На рис. 13 представлены результаты сшивки без учета систематической ошибки и с ее учетом. При учете систематической ошибки видно, что изменилось направление стрелки прогиба. Дополнительно отметим, что результат сшивки содержит меньше шума, вызванного загрязнением оптики интерферометра.

9. Возможные варианты использования разработанной методики

Разработанная методика позволяет проводить прецизионные измерения оптических элементов по схемам, представленным на рис. 14.

Первая схема подразумевает измерение некрупногабаритных элементов. В ней исследуемая поверхность сдвигается вдоль апертуры интерферометра, и измерения проводятся в выбранной области эталона. В данном случае измеренные субапертуры используются для восстановления формы исследуемой поверхности и определения систематической ошибки измерений, как описывалось ранее в статье.

Вторая схема включает в себя использование двух оптических поверхностей: исследуемой и высокоточной опорной. В данной схеме на первом этапе высокоточная опорная поверхность используется для определения систематической ошибки измерений в области эталона, в которой будет проводиться измерение формы исследуемой поверхности. Затем, на втором этапе проводится измерение исследуемой поверхности целиком. Из измеренной формы исследуемой поверхности затем вычитается определенная систематическая ошибка. Такой подход подойдет для измерения неплоских оптических элементов методом сшивки, так как оптические элементы такого типа не позволяют определить систематическую ошибку напрямую рассматриваемым методом сдвига.

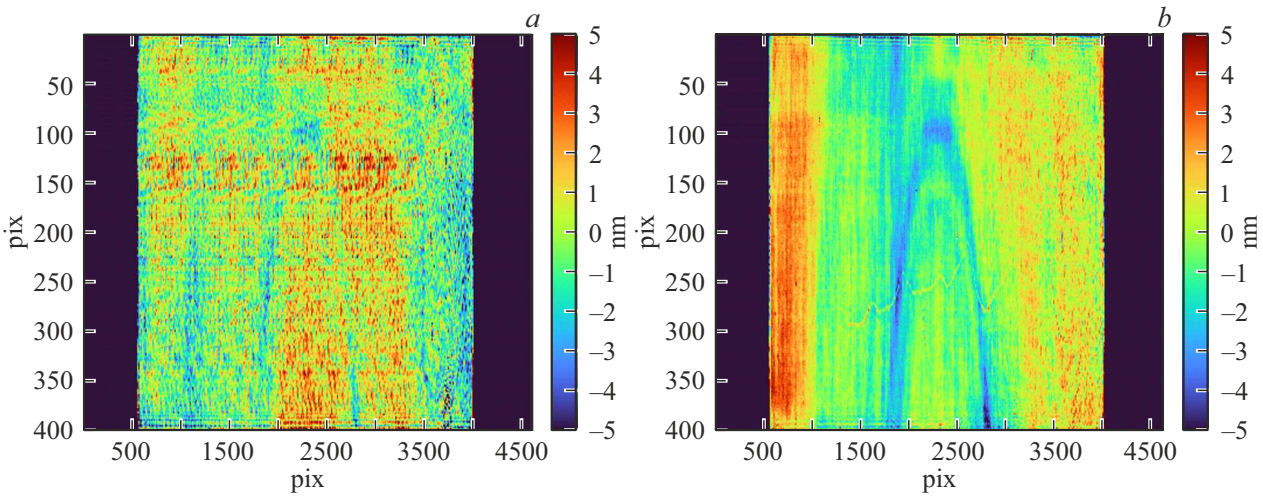

Рис. 13. Результаты сшивки субапертур подложки из монокристаллического кремния с шагом 50 пикселей (95 % область перекрытия): *a* — без учета систематической ошибки (СКО = 1.764 nm, PV = 74.568 nm); *b* — с учетом систематической ошибки (СКО = 1.535 nm, PV = 74.346 nm). Учет систематической ошибки привел к изменению направления стрелы прогиба.

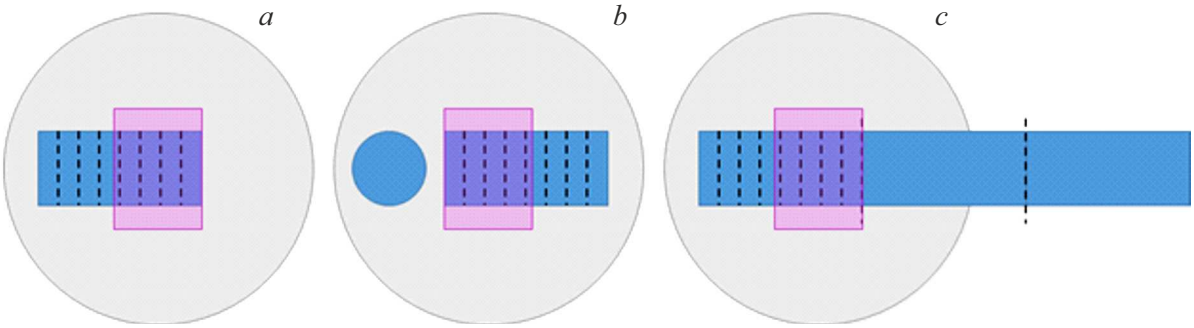

Рис. 14. Потенциальные схемы измерений с использованием методики определения систематической ошибки сдвигом. Серый круг — апертура интерферометра. Розовый прямоугольник — цифровая маска, в которой проводится измерение. Пунктирными линиями схематично обозначены величины смещений; *a* — измерение небольшой „прямоугольной“ поверхности (до 100 mm) методом сдвига целиком, *b* — определение систематической ошибки измерений с помощью „прямоугольной“ поверхности с целью ее учета для исследуемой „круглой“ поверхности, *c* — измерение крупногабаритного оптического элемента методом сшивки; систематическая ошибка определяется на одной из субапертур в процессе измерений.

Третья схема предполагает измерение крупногабаритного плоского оптического элемента методом сшивки с определением систематической ошибки измерений той же самой деталью. Метод заключается в том, что в процессе измерения крупногабаритной плоской детали один из шагов сшивки разбивается на несколько меньших таким образом, чтобы сделать достаточное количество измерений для определения систематической ошибки и использовать ее затем в сшивке. Необходимое число шагов для определения систематической ошибки в данном случае можно определить либо из предварительного моделирования, определив число шагов, при котором остаточная ошибка будет на удовлетворительном уровне, либо проведя предварительные измерения систематической ошибки с выбранной величиной шага для данной детали и исследовав зависимость величины СКО систематической ошибки от числа шагов, как это показано на рис. 6.

Заключение

Разработан метод определения систематической ошибки измерений на интерферометре Физо с плоской эталонной поверхностью.

Повторяемость определения систематической ошибки и профиля исследуемой поверхности оказались лучше 0.2 nm по СКО.

С использованием интерферометра Физо Zygo Verifire была измерена поверхность элемента из плавленого кварца габаритами 25×70 mm с СКО формы 0.571 nm, что составляет порядка $\lambda/1000$. Разработанный метод позволил устранить дифракционные кольца с измеренной карты поверхности.

Также была исследована поверхность крупногабаритного (широкоапертурного) элемента из монокристаллического кремния габаритами 25×200 mm методом сшивки. С учетом систематической ошибки ошибка фор-

мы составила 1.535 nm по СКО. Продемонстрировано, что учет систематической ошибки позволил определить правильное направление стрелы прогиба.

Для валидации метода были проведены два эксперимента.

В первом эксперименте исследуемая поверхность измеряется в прямом и повернутом на 180° положениях. В результате эксперимента полученные систематические ошибки совпали качественно, и отличие их центральных сечений друг от друга составило 0.47 nm по СКО. Результат обработки исследуемой поверхности в прямом положении отличается от таковой в перевернутом положении на 0.23 nm СКО.

Во втором эксперименте систематическая ошибка определялась на двух непересекающихся половинах исследуемой поверхности. Систематические ошибки совпали качественно. СКО разности их центральных сечений составило 0.32 nm.

Финансирование работы

Благодарности и финансирование

Методика разработана при поддержке гранта РНФ № 21-72-30029-П.

Изготовлена кварцевая подложка при поддержке гос. задания № FFUF-2024-0022.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Nicolas, M.L. Ng, P. Pedreira, J. Campos, D. Cocco. Opt. Express, **26** (21), 27212 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.027212
[2] S. Chen, Y. Dai, S. Li, X. Peng, J. Wang. Opt. Laser Technol., **44** (5), 1543 (2012). DOI: 10.1016/j.optlastec.2011.12.002
[3] I. Powell, E. Goulet. Appl. Opt., **37** (13), 2579 (1998). DOI: 10.1364/AO.37.002579
[4] P.B. Keenan. SPIE, **429**, 2 (1983). DOI: 10.1117/12.936333
[5] B.S. Fritz. Opt. Engineer., **23** (4), 379 (1984). DOI: 10.1117/12.7973304
[6] M. Otsubo, K. Okada, J. Tsujiuchi. Opt. Engineer., **33** (2), 608 (1994). DOI: 10.1117/12.152248
[7] M.B. Da Silva, S.G. Alcock, I.T. Nistea, K. Sawhney. Opt. Lasers Engineer., **161**, 107192 (2023). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107192
[8] M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo, L.A. Goncharov, A.K. Chernyshev, I.G. Zabrodin, I. Kaskov, P.V. Krainov, D.I. Astakhov, V.V. Medvedev. Nucl. Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **1010**, 165554 (2021). DOI: 10.1016/j.nima.2021.165554
[9] Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.standa.lt/
[10] M. Erlong, G. Yongqiang. Acta Optica Sinica, **31** (12), 1212008 (2011). DOI: 10.3788/aos201131.1212008
[11] H. Yumoto, S. Matsuyama, H. Mimura, K. Yamauchi, H. Ohashi. Nucl. Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **710**, 2 (2013). DOI: 10.1016/j.nima.2012.10.126
[12] Е.И. Глушков, И.В. Малышев, А.И. Николаев, Е.В. Петраков, Н.И. Чхало, Р.А. Шапошников. ЖТФ, **95** (10), 1984 (2025). DOI: 10.61011/JTF.2025.10.61352.170-25