

И. А. Выхристюк¹✉, С. Д. Жданов^{1,2}, Р. В. Куликов¹, Е. В. Сысоев¹

Исследование влияния неравномерности скорости сканирования на результаты измерения рельефа поверхности интерференционным профилометром

¹Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: I_Vykhristyuk@mail.ru

Аннотация. Исследованы причины возникновения систематической погрешности измерения высоты рельефа интерференционным профилометром. Проведено моделирование процесса измерения. Выявлено влияние неравномерности скорости сканирования на систематическую погрешность измерения.

Ключевые слова: интерферометр белого света, профилометр, погрешность измерения

I. A. Vykhristyuk¹✉, S. D. Zhdanov^{1,2}, R. V. Kulikov¹, E. V. Sysoev¹

Study of the influence of scanning speed non-uniformity on the results of surface relief measurement by an interference profilometer

¹Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: I_Vykhristyuk@mail.ru

Abstract. The causes of the systematic measurement error in the interference profilometer are investigated. The measurement process is simulated. The influence of the scanning speed non-uniformity on the systematic measurement error is revealed.

Keywords: white light interferometer, profilometer, measurement error

Введение

Измерение рельефа поверхности интерферометром белого света методами фазового сдвига производится смещением (сканированием) интерферометра или эталонного объекта относительно измеряемой поверхности, или наоборот. В процессе сканирования регистрируются интерферограммы, затем по их набору восстанавливается профиль поверхности [1].

Неопределенность положения сканирования является одним из факторов, приводящих к ошибкам измерения [2].

При изготовлении относительно недорогих профилометров для контроля качества промышленных изделий с разрешающей способностью по глубине по-

рядка микрометра [3,4] сканирование может производиться моторизованным столом.

В статье [5] описан эксперимент, позволивший обнаружить неравномерность скорости движения стола внутри одного шага шагового двигателя, обеспечивающего сдвиг профилометра на ~ 5 мкм, что может приводить к ошибкам в измерениях в микродиапазоне.

В данной работе исследуется влияние неравномерности скорости движения моторизованного стола отдельно взятого профилометра на погрешность измерения профиля поверхности методом дифференциальных интерферограмм [6]. Проведено моделирование процесса измерения, исследован вклад различных факторов в ошибку измерения, проведен анализ возможности снижения ошибки, вызванной неравномерностью движения. Выполнено сравнение результатов моделирования с натурным экспериментом.

Выявление систематической погрешности измерения

Метод дифференциальных интерферограмм разрабатывался для измерения рельефа поверхностей с шероховатостью порядка 1 мкм. На таких поверхностях сложно следить за фазой интерференционного сигнала. Можно лишь фиксировать наличие или отсутствие интерференции в пикселе на определенных шагах сканирования.

В первых приборах, реализующих данный метод, сканирование производилось в пошаговом режиме [3]. Вначале моторизованный стол сдвигает интерферометр на 1 мкм, затем регистрируются две противофазные интерферограммы, для чего используется пьезокерамический актюатор, сдвигающий зеркало в опорном плече на величину $\sim \lambda/4$ (четверть эффективной длины волны источника света).

С появлением высокопроизводительных графических ускорителей стало возможно вычислять дифференциальные интерферограммы со скоростью регистрации кадров видеокамерой. При этом отпала необходимость в пошаговом сканировании. Требуется только синхронизировать скорость сканирования и частоту получения кадров, чтобы смещение интерферометра между кадрами составляло $\sim \lambda/4$.

Для исследования предельных характеристик профилометра измерялась поверхность плоского оптического зеркала. В результате измерения обнаружена погрешность, представляющая собой неровности в виде волн, повторяющие на плоскости форму интерференционных полос в интерферограммах при сканировании (рис. 1).

Измеряемая область поверхности зеркала имеет размеры 1,12 мм \times 0,7 мм. Наклон зеркала приводит к перепаду высот в основном вдоль оси X на величину 34 мкм. Профилометр измеряет рельеф в 1920×1200 точках.

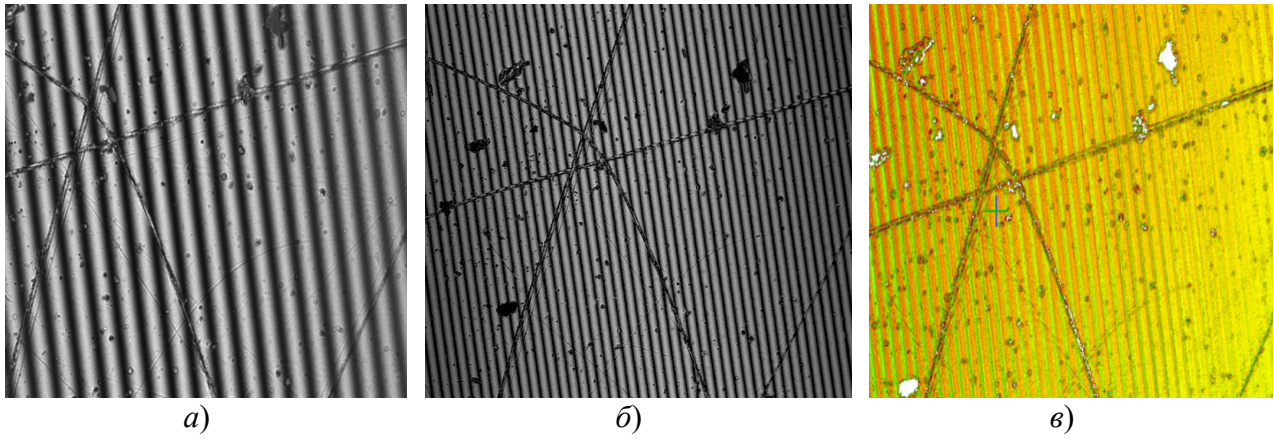


Рис. 1. Связь формы интерференционных полос и ошибки измерения:
 а – интерферограмма, б – дифференциальная интерферограмма,
 в – 3D-результат измерения, вид сверху

Волны на измеренном рельефе отклоняются от базовой плоскости на величину ΔD с локальной амплитудой от 0,2 до 1 мкм для сканирования с шагом 1 мкм, и от 0,1 до 0,5 мкм для сканирования с шагом 0,5 мкм. Амплитуда волн изменяется плавно (рис. 2 и 3).

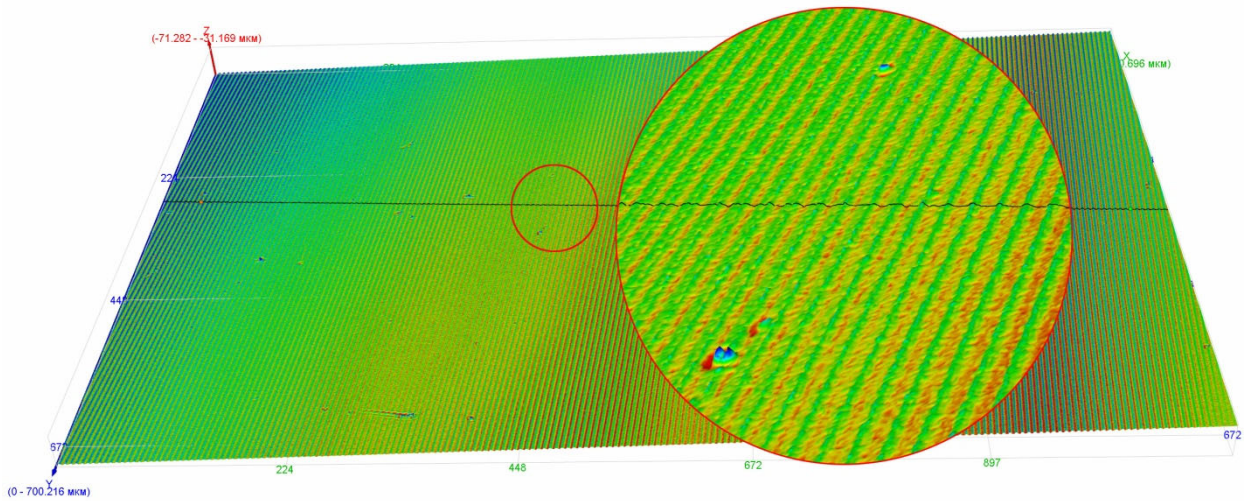


Рис. 2. Измеренный с шагом 1 мкм рельеф поверхности: 3D-модель с линией сечения и увеличенным фрагментом

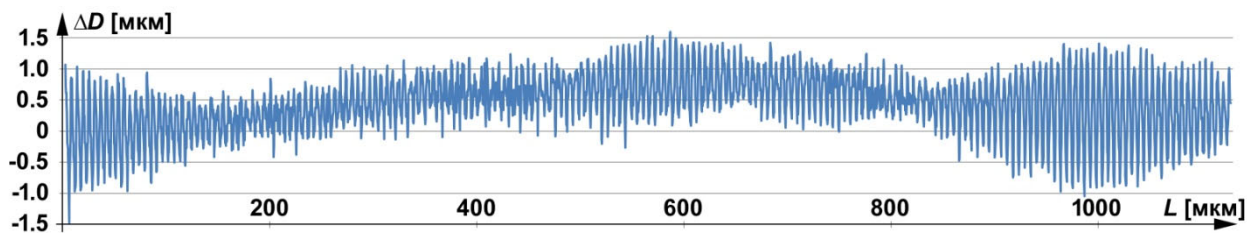


Рис. 3. Отклонение рельефа от базовой плоскости вдоль линии сечения

Так как ошибка, очевидно, носит систематический характер, то ее устранение возможно после понимания причин ее возникновения. С этой целью проведено численное исследование влияния различных факторов на ошибку измерения.

Моделирование процесса измерения

В случае интерференции частично когерентных волн распределение интенсивности светового потока в интерферограмме описывается известной функцией [7]:

$$I(z, h) = I_0 \cdot \left(1 + b(z, h) \cdot \cos \left(4\pi \frac{z - h}{\lambda} \right) \right),$$

где I_0 – среднее значение интенсивности светового потока, b – модуль комплексной степени когерентности, z – текущее положение опорного зеркала (текущая координата), h – положение измеряемой поверхности, λ – эффективная длина волны. При использовании источника света с гауссовым спектром плотности мощности излучения модуль комплексной степени когерентности может быть записан в виде:

$$b(z, h) = A \cdot \exp \left(-4 \cdot \left(\frac{z - h}{l_c} \right)^2 \right),$$

где A – амплитуда интерференционного сигнала, l_c – длина когерентности света, рассчитанная по уровню $e^{-1} \cdot A$.

При моделировании процесса измерения участка поверхности с высотой h формируется набор действительных координат сканирования $Z^R = \{Z_k^R \mid k \in \{1, \dots, K\}\}$ и соответствующий ему набор действительных интенсивностей (коррелограмма) $I^R(h) = \{I(z, h) \mid z \in Z^R\}$.

Далее набор Z^R преобразуется в набор $Z^M = \{Z_k^M \mid k \in \{1, \dots, K\}\}$ измеренных координат сканирования. При этом действительные координаты могут получить случайную добавку и подвергнуться снижению точности до определенного уровня (например, до 0,1 мкм, как в исследуемом приборе).

Набор $I^R(h)$ преобразуется в набор $I^M(h) = \{I_k^M\}$ зарегистрированных интенсивностей. Здесь интенсивность может быть подвергнута дискретизации, добавлению шума и пороговому отсечению (например, 0 – 255).

По наборам Z^M и $I^M(h)$ и коэффициенту порога обнаружения интерференции I_{thr} , используя алгоритмы метода дифференциальных интерферограмм, вычисляется h^M – измеренная высота:

$$h^M = \sum_{d \in D} \bar{z}_d \cdot w_d, \quad (1)$$

$$\text{где } D = \left\{ d \in D \{2, 3, \dots, K\} \mid \left| I_d^M - I_{d-1}^M \right| > I_{thr} \cdot \sqrt{I_d^M + I_{d-1}^M} \right\},$$

$$\bar{z}_d = \frac{z_d^M + z_{d-1}^M}{2},$$

$$w_d = \left| I_d^M - I_{d-1}^M \right| - I_{thr} \cdot \sqrt{I_d^M + I_{d-1}^M}.$$

То есть, измеренная высота является средневзвешенной измеренной координатой сканирования тех шагов, на которых была обнаружена интерференция. При этом весом является уровень интерференционного сигнала, а порог пропорционален корню из средней интенсивности [8]. Отдельно надо отметить, что при вычислении $I^R(h)$, из которых формируются $I^M(h)$, используются значения действительных Z^R , а не измеренных Z^M координат. Значения Z^M используются только для вычисления h^M .

Численный эксперимент

Будем рассматривать влияние на ошибку измерения следующих факторов: потеря точности при измерении положения интерферометра (датчик перемещения), дискретизация и зашумление регистрируемой интенсивности при оцифровке (матрица видеокамеры), неравномерность шагов сканирования, вызванная неравномерностью скорости движения интерферометра (моторизованный стол).

Зададим параметрам модели следующие значения, соответствующие исследуемому прибору и способу измерения: $l_c = 10$ мкм, $\lambda = 630$ нм, $I_0 = 125$, $A = 25$, $I_{thr} = 1$.

Моделирование производится для режимов DI1 – пошаговый с шагом 1 мкм, DI0.5 – пошаговый с шагом 0,5 мкм, DI2 – непрерывный по двум интерферограммам, DI10 – непрерывный по 10 интерферограммам.

DI N является модификацией метода, при которой шаги сканирования меньше в $N-1$ раз, а при вычислениях на каждом шаге сканирования используется набор из N последних интерферограмм. В вычислениях (1) участвует только та пара, модуль разницы которых максимален. Этот режим разрабатывался для снижения влияния неопределенности координаты сканирования на ошибку измерения. Чем больше N , тем устойчивее измерения, но тем больше требования к вычислительной мощности.

Проверка осуществляется для различных положений h в диапазоне от -6 до 6 мкм (диапазон больше длины когерентности) с шагом 1 нм. Ошибка измерения $\varepsilon = h - h^M$ может быть отрицательной, но для сравнения режимов будем использовать максимум модуля.

Для определения наилучших точностных характеристик, которые можно получить при измерениях, моделировалась ситуация, когда $Z^M = Z^R$ и $I^M(h) = I^R(h)$. Результаты приведены на рис. 4 и в итоговой табл. 1 в строке «Предел точности».

Для пошаговых режимов видна периодическая ошибка с амплитудой ~ 100 нм и периодом $\lambda/4$, что объясняется несимметричностью «попадания» координат сканирования в измеряемые высоты. DI2 дает практически идеальный результат, но имеет неизмеренные области, соответствующие тем, где уровень интерференционного сигнала на всех шагах сканирования близок к среднему значению яркости. DI10 имеет систематическую ошибку ~ 5 нм, но не имеет неизмеренных зон, и ошибка меньше отклоняется от среднего значения.

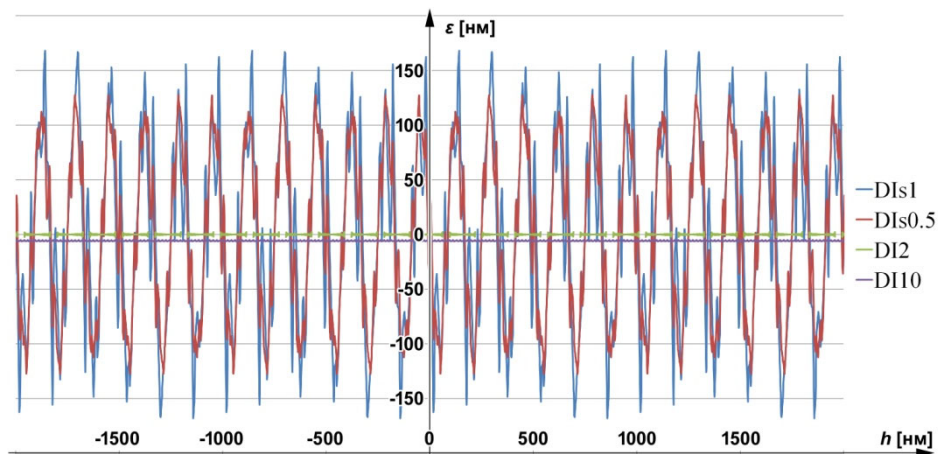


Рис. 4. Зависимость ошибки измерения от измеряемой высоты

Влияние оцифровки координаты сканирования

При измерении профиля поверхности методом дифференциальных интерферограмм используется отсчетное устройство, позволяющее определять взаимное смещение интерферометра и объекта измерения. Отсчетное устройство в исследуемом приборе имеет разрешающую способность 0,1 мкм, в связи с чем моделирование будет производиться со следующим преобразованием (координаты z имеют размерность мкм):

$$z_k^M := \text{round}(10 \cdot z_k^R) \cdot 0,1.$$

Проведенное моделирование показало, что для пошаговых методов ничего не изменилось. Очевидно, на это повлияло то, что шаги и значения координаты сканирования были кратны разрешающей способности. Для непрерывных режимов ошибка возросла примерно на 50 нм и для DI2 приобрела более выраженный периодический характер.

Результаты приведены в табл. 1 в строке «Датчик перемещения» и на рис. 5.

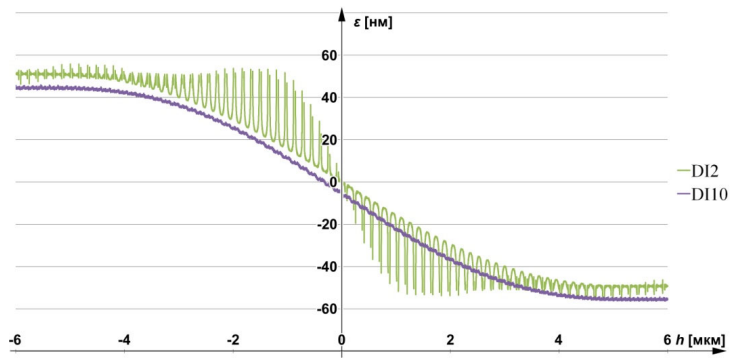


Рис. 5. Зависимость ошибки измерения от измеряемой высоты при моделировании влияния датчика перемещения

Влияние оцифровки интенсивности и шума сигнала

При моделировании оцифровки интерферограмм использован уровень шума, замеренный на профилометре. При средней яркости пикселя 40 величина стандартного отклонения (шум) составляет 0,65, для яркости 240 – 1,35. Моделирование проводилось по следующей схеме:

$$I_k^M := \text{Байт}\left(I_k^R + \text{Шум}\left(I_k^R\right)\right),$$

где $\text{Шум}(x)$ – случайная величина с нормальным распределением ($\mu = 0$, $\sigma = 0,65 + 0,7 \cdot (x - 40)/200$), $\text{Байт}(x) = \max(0, \min(255, \text{round}(x)))$ – функция округления и проверки выхода за границы допустимых значений.

Добавление шума в интерферограммы для DI2 привело к появлению периодических выбросов до 1,3 мкм. Эти выбросы находятся недалеко от границ областей, которые не были измерены при отсутствии шума. Они могут быть уменьшены до десятков нанометров повышением коэффициента порога, но для сравнения режимов используются одинаковые параметры модели, близкие к реальным.

Результаты приведены в табл. 1 в строке «Матрица видеокамеры» и на рис. 6.

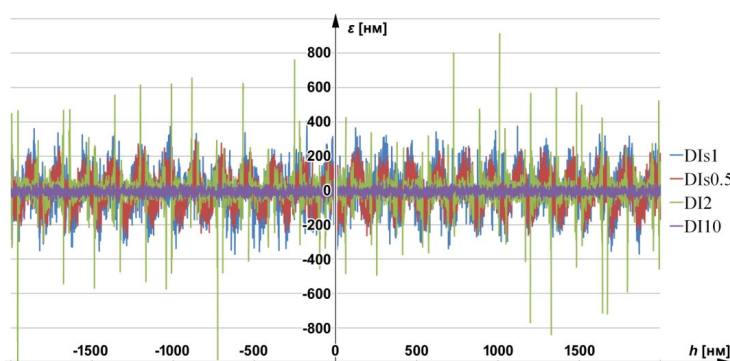


Рис. 6. Зависимость ошибки измерения от измеряемой высоты при моделировании влияния матрицы видеокамеры

Влияние неравномерности скорости сканирования

Наблюдение за дифференциальными интерферограммами (для визуализации дифференциальная интерферограмма преобразуется в изображение, где яркость пикселя соответствует модулю разности яркостей противофазных интерферограмм) в процессе измерения наклонной поверхности в режиме DI2 выявило периодические изменения яркости вплоть до полного исчезновения интерференционного сигнала (уровень ниже порога) на некоторых шагах. Это навело на мысль о неравномерности скорости сканирования. В результате эксперимента [5] получены коррелограммы с заметными периодическими растяжениями и сжатиями с периодом ~ 5 мкм, что соответствует перемещению интерферометра моторизованным столом за один шаг шагового двигателя.

Для моделирования такого поведения моторизованного стола проводились следующие преобразования с набором действительных координат сканирования:

$$z_k^R := z_k^R + A \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left(z_k^R - C\right) / B\right)$$

где $A = 1$ мкм – амплитуда, $B = 5$ мкм – период, $C = 2,5$ мкм – центр неравномерности скорости перемещения моторизованного стола. Параметры A и B подбирались для соответствия натурному эксперименту, C – для отображения результатов численного эксперимента.

Моделирование неравномерности движения моторизованного стола оказала самое сильное влияние на все режимы, кроме DI2, но если не учитывать артефактные выбросы при моделировании матрицы, то и на него. Характер и величина ошибки близки к величинам, полученным на экспериментальных данных.

Результаты приведены в табл. 1 в строке «Моторизованный стол» и на рис. 7.

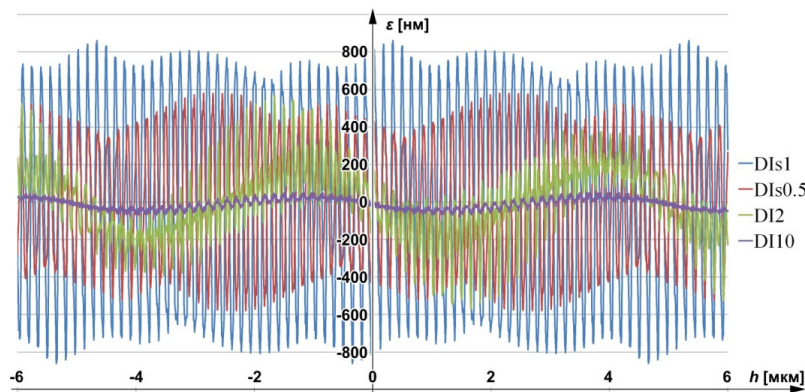


Рис. 7. Зависимость ошибки измерения от измеряемой высоты при моделировании влияния моторизованного стола

Влияние всех факторов, сравнение с натурным экспериментом

При использовании в моделировании всех факторов получен результат, показанный в табл. 1 в строке «Все факторы» и на рис. 8.

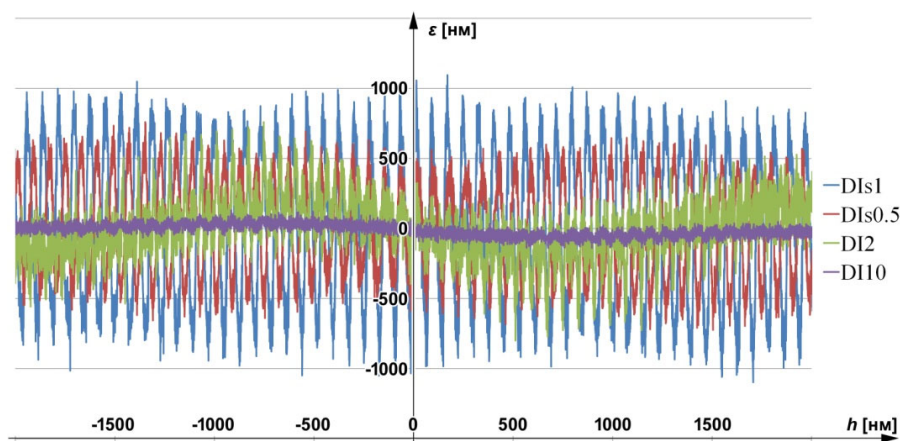


Рис. 8. Зависимость ошибки измерения от измеряемой высоты при моделировании всех факторов

Таблица 1

Максимальная величина ошибки (нм)

	DI0.5	DI1	DI2	DI10
Предел точности	127,4	168,1	2,2	6,1
Датчик перемещения	127,4	168,1	55,7	56,3
Матрица видеокамеры*	361,9	462,2	1312,7	90,7
Моторизованный стол	579,7	860,7	569,3	69,5
Все факторы*	741,5	1138,6	818,1	167,0

*Максимальные значения не постоянны, так как при моделировании используются случайные величины. Множественные эксперименты для получения статистики не проводились.

Для сравнения моделирования с натурным экспериментом наклонное зеркало измерялось во всех режимах (см. табл. 2). Лучший результат показал режим DI10 (рис. 9). Стоит отметить, что измерение в режиме DI0.5 заняло 2 минуты, а в режимах DI2 и DI10 около 10 секунд.

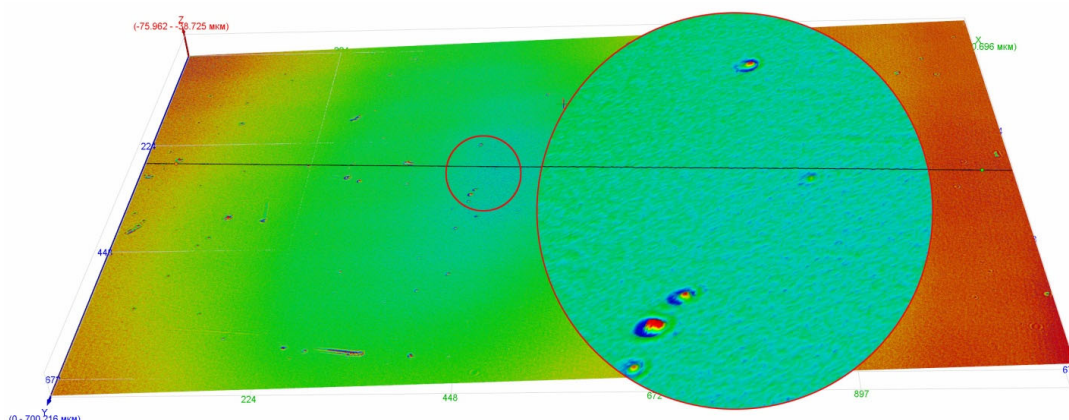


Рис. 9. Измеренный в режиме DI10 рельеф поверхности: 3D модель с линией сечения и увеличенным фрагментом

Как видно, волнистость практически исчезла (сравним с рис. 2). Есть отклонение от плоскости, выраженное в прогибе центральной части рельефа. Это может быть вызвано как все той же неравномерностью движения стола, так и фазовой аппаратной функцией интерферометра, или неравномерностью уровня освещения по полю.

Таблица 2

Отклонения от плоскости в натурном эксперименте (нм)

	DI _s 0.5	DI _s 1	DI2	DI10
Ra (среднее)	257	372	306	153
RMS (среднеквадратичное)	332	474	417	188

Заключение

Выявлена систематическая погрешность измерения интерференционным профилометром. Написана математическая модель формирования измерительных данных. Сравнение результатов моделирования с натурными экспериментами показало:

- 1) соотношение величин ошибок для различных режимов совпадает;
- 2) величины и характер поведения ошибок схожи.

Анализ результатов моделирования процесса измерения методом дифференциальных интерферограмм в различных режимах показал:

- 1) наибольший вклад в ошибку измерения среди всех рассмотренных факторов вносит неравномерность скорости сканирования;
- 2) ошибка, связанная с фотоприемным устройством, для пошаговых режимов увеличивается в два раза относительно предела. Для DI2 приводит к артефактным выбросам, которые, при включении остальных факторов, пропадают, как отдельное явление;
- 3) ошибка, связанная с датчиком перемещения, для непрерывных режимов не превышает 60 нм и имеет очень гладкий характер.

Использование метода DI10 позволило снизить уровень систематической погрешности в натурном эксперименте: по полю в 2 раза, локально – практически до нуля. Максимальная величина погрешности снизилась незначительно, но характер ее изменился.

Результаты моделирования и численного эксперимента позволяют надеяться, что при устранении причин систематической погрешности второго порядка (замеченную в натурном эксперименте при DI10, рис. 9) уровень среднеквадратичной ошибки измерения (RMS) не будет превышать 30–50 нм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao, Hang & Xie, Yijun & Zhu, Renlong & Dong, Zhengqiong & Wang, Xuanze & Liu, Shiyuan & Zhu, Jinlong. (2025). Robust vertical scanning interferometry at a long coherence length. *Optics and Lasers in Engineering*. 186. 108769. 10.1016/j.optlaseng.2024.108769.

2. Sysoev Evgeny, Kulikov Rodion, Vykhristyuk Ignat, Chugui Yuri Correction of Scanning Steps to Improve Accuracy in Interferometric Profilometer // Measurement Science Review. – 2015. – V. 15. – N. 1. – Pp. 9–12.
3. Сысоев Е.В., Голубев И.В., Чугуй Ю.В., Шахматов В.А. Измерение локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // Автометрия. – 2004. – Т. 40. – № 5. – С. 4–13.
4. Th. Dresel, G. Häusler, H. Venzke Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // Applied Optics. – 1992. – V. 31. – Issue 7. – Pp. 919–925.
5. Выхристюк И.А., Куликов Р.В., Сысоев Е.В. Исследование неравномерности сканирования в оптическом интерференционном микроскопе // Автометрия. – 2024. – Т. 60. – № 4. – С. 101–108.
6. Сысоев Е.В., Выхристюк И.А., Куликов Р.В., Поташников А.К., Разум В.А., Степнов Л.М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – Т. 46. – № 2. – С. 119–128.
7. Fleischer Matthias, Windecker Robert, Tiziani Hans J Theoretical Limits of Scanning White-Light Interferometry Signal Evaluation Algorithms // Applied Optics. – 2001. – V. 40. – Issue 17. – Pp. 2815–2820.
8. Сысоев Е.В., Поташников А.К. Адаптивная пороговая обработка дифференциальных интерферограмм // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 1. – С. 20–25.

© И. А. Выхристюк, С. Д. Жданов, Р. В. Куликов, Е. В. Сысоев, 2025