

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ МЕТОДИЧЕСКИМИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ ПОГРЕШНОСТЯМИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА И ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ

Д. А. НОВИКОВ*, **С. А. КОНОНОВ***, **С. Ю. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ***,
Г. Н. ВИШНЯКОВ**, **А. С. ГУСЕВ****, **Г. Г. ЛЕВИН****, **В. Л. ЛЯСКОВСКИЙ****

**Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия, e-mail: s.zolotarevskiy@vniims.ru*

***Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических
измерений, Москва, Россия*

Приведены результаты анализа методических и инструментальных погрешностей, неизбежно возникающих при измерении параметров рельефа и формы поверхности методами 3D-интерферометрии с опорным волновым фронтом и интерферометрии бокового сдвига. Отмечено, что наибольший вклад в суммарную методическую погрешность вносят погрешности измерений текущих порядков интерференции, погрешности измерения текущих координат и сдвига пренебрежимо малы. Показано, что суммарная погрешность метода приближенного интегрирования связана с погрешностью интерполяции и зависит от состояния формы поверхности.

Ключевые слова: лазерная интерферометрия, характеристика текстуры поверхности.

The results of analysis of methodical and instrumental errors unavoidable at measuring the surface relief and forms parameters by methods of 3D-interferometry with reference wave front and lateral shift interferometry are presented. It is noted that the largest contribution to total methodical error make the errors of measurements of current interference orders while the errors of current coordinates and shift measurement are negligible. The total error of the method of approximate integration is related to the interpolation error and depends on the surface shape.

Key words: laser interferometry, characterization of texture of a surface.

При измерениях параметров рельефа и формы поверхности в микро- и нанометровом диапазонах изменений волнового фронта, определяемых различными модификациями 3D-интерферометрии, неизбежны погрешности [1 – 4]:

методические, возникающие при обратном преобразовании результатов измерения текущих координат порядков интерференции с учетом вероятностной оценки априорной информации;

инструментальные, присущие всем элементам средства измерений, начиная от первичного измерительного преобразователя и заканчивая системой регистрации и отображения измерительной информации;

обусловленные влиянием внешних воздействий.

В общем случае классификационная схема погрешностей измерений параметров рельефа и формы поверхностей при интерферометрии с опорным волновым фронтом и интерферометрии бокового сдвига представлена на рис. 1.

Погрешности изготовления оптических элементов, а также юстировки элементов интерферометра относительно друг друга и контро-

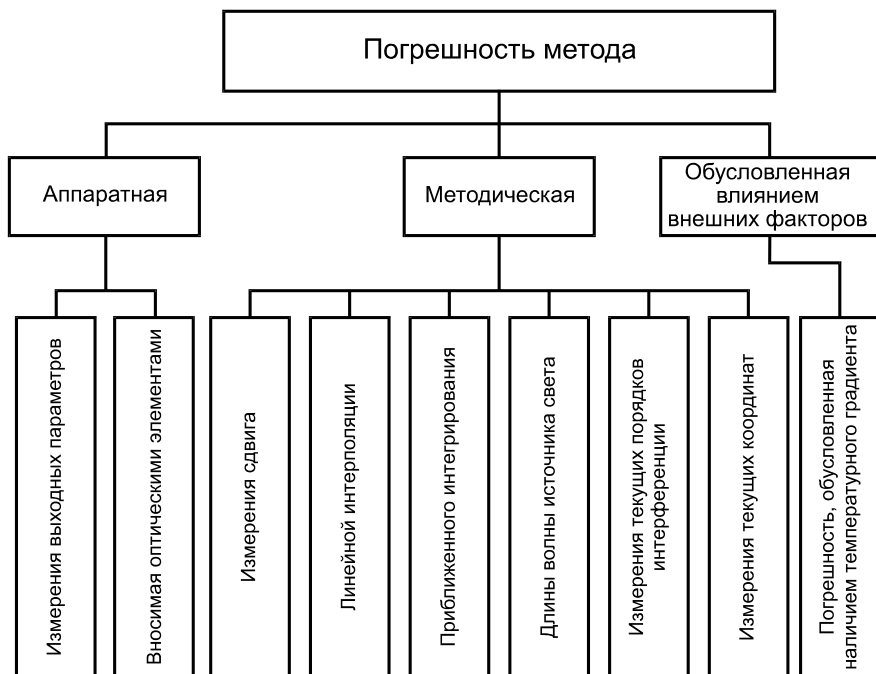


Рис. 1. Классификационная схема погрешностей измерений параметров рельефа и формы поверхностей при интерферометрии бокового сдвига и с опорным волновым фронтом

лируемой поверхности приводят к погрешностям при коррекции волнового фронта и обуславливают аппаратную погрешность интерферометра, имеющую систематическую и случайную составляющие.

Применительно к интерферометрии с опорным волновым фронтом [3, 4.] основными источниками систематической составляющей погрешности являются погрешности измерения радиусов кривизны поверхностей и толщины линз, воздушных промежутков, показателя преломления, а также погрешности, порождаемые взаимным расположением элементов (смещением и поворотом линз). Кроме того, сюда относятся также погрешности формы оптических элементов компенсатора, связанные как с качеством его изготовления, так и с возможными пережатами элементов в оправах.

Составляющая случайной инструментальной погрешности, проявляющаяся при повторных измерениях, обусловлена погрешностями юстировки всего интерферометра по отношению к контролируемой поверхности. Выходные параметры интерференционных преобразователей – ширина интерференционных полос и их конфигурация – определяются типом интерферометра, его настройкой и состоянием измеряемой формы поверхности [3].

Для оценки методической погрешности при интерферометрии с опорным волновым фронтом воспользуемся зависимостями, связывающими оценку отклонений формы поверхности, текущие координаты и порядки интерференционных полос. Указанные величины независимы, а погрешность их измерений в большей мере определяется случайной составляющей, которую будем характеризовать дисперсией

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = \sigma_{y_i}^2 + \sigma_{N_{pi}}^2,$$

где $\sigma_{y_i}^2$, $\sigma_{N_{pi}}^2$ – оценка суммарных дисперсий величин, определяемых измерением текущих координат, и оценка порядка интерференции, соответственно.

Рассмотрим указанные погрешности для трех различных случаев: волновой фронт имеет только наклон, только расфокусировку и наклон и расфокусировку.

Для первого случая порядок интерференции (для $x = 0$) может быть представлен как $N_n = A_2 y_i$, а погрешность ΔN_i исследуемого волнового фронта в виде $\Delta N_i = N_{pi} - A_2 y_i$. Вычисляемый методом наименьших квадратов коэффициент A_2 определим как

$$A_2 = \sum_{i=1}^n N_{pi} \cdot y_i / \sum_{i=1}^n y_i .$$

В этом случае дисперсия, применительно к измерению площади поверхности размером S , $\tilde{\sigma}_{S_{\text{общ}}}$ может быть представлена в виде:

$$\tilde{\sigma}_{S_{\text{общ}}}^2 = \tilde{\sigma}_{SN_{pi}}^2 + y_i \left(\partial A_2 / \partial N_{pi} \right)^2 \tilde{\sigma}_{SN_{pi}}^2 + y_i \left(\partial A_2 / \partial y_i \right)^2 \tilde{\sigma}_{y_i}^2 .$$

Для волнового фронта, имеющего расфокусировку, коэффициент A_3 получим из выражения

$$A_3 = \sum_{i=1}^n N_{pi} y_i^2 / \sum_{i=1}^n y_i^4 ,$$

а дисперсию $\tilde{\sigma}_{S_{\text{общ}}}$ из формулы

$$\tilde{\sigma}_{S_{\text{общ}}}^2 = \tilde{\sigma}_{SN_{pi}}^2 + y_i^4 \left(\partial A_3 / \partial N_{pi} \right)^2 \tilde{\sigma}_{SN_{pi}}^2 + y_i^4 \left(\partial A_3 / \partial y_i \right)^2 \tilde{\sigma}_{y_i}^2 .$$

На основании полученных зависимостей оценены составляющие погрешностей от дисперсии единичных измерений $\sigma_{SN_{pi}} = 0,03$, $\sigma_{y_i} = 1$ мкм. Наибольший вклад в суммарную погрешность вносят погрешности измерений текущих порядков интерференции. Составляющей, определяемой погрешностью измерения текущих координат, можно пренебречь.

Дисперсия $\tilde{\sigma}_{S_{\text{общ}}}$ — с учетом только погрешности измерения текущих порядков интерференции

$$\tilde{\sigma}_{S_{\text{общ}}}^2 = \tilde{\sigma}_{SN_{pi}}^2 + y_i^2 \left(\partial A_2 / \partial N_{pi} \right)^2 \tilde{\sigma}_{SN_{pi}}^2 + y_i^4 \left(\partial A_3 / \partial N_{pi} \right)^2 \tilde{\sigma}_{SN_{pi}}^2 .$$

Погрешность оценки формы поверхности в этом случае составляет около 0,07 интерференционной полосы. Графики зависимостей $\sigma(y)$ для всех трех случаев представлены на рис. 2.

Интерферометр бокового сдвига. Основным источником погрешностей, вносимых оптическими элементами, являются светоделительные элементы, приводящие к деформациям волнового фронта и определяющие, в основном, систематическую составляющую инструментальной погрешности (см. рис. 1).

Составляющая случайной инструментальной погрешности, проявляющаяся при повторных измерениях, связана с погрешностями юстировки интерферометра по отношению к контролируемой поверхности и

приводит к дополнительным деформациям волнового фронта типа комы и астигматизма [4].

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что инструментальная погрешность, обусловленная наличием светоделительных элементов в системе интерферометра, определяется, в основном, систематической составляющей, значение которой для контролируемых поверхностей не превышает 0,1 интерференционной полосы, и в большинстве случаев при оценке формы поверхности ей можно пренебречь.

Для определения методической погрешности воспользуемся зависимостями, связывающими оценку отклонений формы исследуемого волнового фронта, текущие координаты, порядки интерференционных полос и априорную информацию [3, 4]. Указанные величины независимы, а ввиду того, что при измерениях требуется находить относительные значения текущих параметров, погрешность их измерений в большей мере определяется случайной составляющей. Случайную составляющую общей погрешности охарактеризуем дисперсией

$$\tilde{\sigma}_{\text{общ}}^2 = \tilde{\sigma}_{y_i}^2 + \tilde{\sigma}_{N_{pi}}^2 + \tilde{\sigma}_q^2 + \tilde{\sigma}_{\text{инт}}^2,$$

где $\tilde{\sigma}_q^2$, $\tilde{\sigma}_{\text{инт}}^2$ – оценка дисперсии, вносимой погрешностью измерения сдвига, и оценка суммарной дисперсии метода приближенного интегрирования.

Для сферических поверхностей после преобразования получим выражения для оценок дисперсии погрешностей измерений порядка интерференции $\tilde{\sigma}_{N_{pi}}^2$, координат $\tilde{\sigma}_{y_i}^2$ и сдвига q $\tilde{\sigma}_q^2$, соответственно:

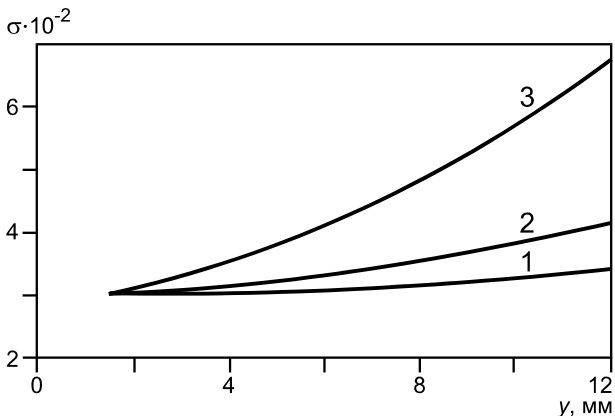


Рис. 2. Графики составляющих погрешностей от дисперсии единичных измерений:

1 – 3 наклон, расфокусировка, одновременные наклон и расфокусировка волнового фронта, соответственно

$$\tilde{\sigma}_{y_i}^2 = \left\{ \left[\sum_{i=1}^{n-1} (y_{i+1}^2 - y_i^2) \right]^2 (\partial A_3 / \partial y_i)^2 + \left[\sum_{i=1}^{n-1} (y_{i+1} - y_i) 2 A_3 \right]^2 \right\} \frac{\tilde{\sigma}_{N_{pi}}^2}{q^2},$$

$$\tilde{\sigma}_{Sy_i}^2 = \left\{ \left(\frac{\partial A_3}{\partial y_i} \right)^2 \left[\sum_{i=1}^{n-1} (y_{i+1}^2 - y_i^2) \right]^2 / 4 + \left[\sum_{i=1}^{n-1} (y_{i+1} - y_i) 2 A_3 \right]^2 \right\} \frac{\tilde{\sigma}_{N_{pi}}^2}{q^2},$$

$$\tilde{\sigma}_q^2 = \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} (y_{i+1} - y_i) [A_3 (y_{i+1} + y_i) - (Np_i + Np_{i+1})] \right\} \tilde{\sigma}_{N_{pi}}^2 / 2 q^2.$$

Оценка параметров измеряемой формы поверхности для интерференционных методов выражается в длинах волн источника света, что обуславливает методическую погрешность, имеющую систематическую и случайную составляющие [1, 5]. Наибольший интерес, с метрологической точки зрения, представляет случайная составляющая. Ее источниками для лазеров могут быть случайные изменения газового давления, электрических условий в газовом разряде, плотности тока и т. д. В работах по исследованию неустойчивости длины волны лазерных источников света, используемых в интерферометрии, приведены результаты оценок указанной погрешности и отмечены пути повышения стабильности [3, 4]. Показано также, что используемые в настоящее время промышленные лазерные источники света имеют относительную неустойчивость 10^{-7} . Такой погрешностью при оценке параметров формы поверхности можно пренебречь. Погрешность, связанная с влиянием внешних факторов [5, 6], определяется в основном температурным градиентом в рабочей ветви интерферометра, вызывающим градиент показателя преломления, что и приводит к появлению дополнительной разности хода.

Методическая погрешность в основном обусловлена случайной составляющей, наибольший вклад в суммарную погрешность вносят погрешности измерений порядка интерференции. Погрешности измерений текущих координат и сдвига пренебрежимо малы. Суммарная погрешность метода приближенного интегрирования связана с погрешностью интерполяции и зависит от состояния формы поверхности.

Количественными характеристиками воспроизводимости являются топографическая карта разности значений волновых фронтов нескольких (чаще всего двух) последовательных серий измерений, полученная

на заданной системе точек, и значение среднеквадратической погрешности разности измеренных волновых фронтов. На воспроизводимость показаний современных лазерных интерферометров оказывают влияние шумы лазера, электронной части интерферометров, турбулентность атмосферы, вибрации, при этом основной фактор – шум лазерного излучения. Наименьшее значение среднеквадратичной погрешности разности волновых фронтов составило 0,01 полосы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.552.11.7056) с применением оборудования Центра коллективного пользования ВНИИОФИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Вишняков Г. Н. и др.** Методы автоматизации обработки интерферограмм фазовых объектов // Метрология. 2008. № 4. С. 15–25.
2. **Метрологическое** обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии: Учебное пособие / Под ред. В. Н. Крутикова. М.: Логос, 2011.
3. **ГОСТ Р 8.743–2011.** ГСИ. Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Часть 1. Термины, определения и основные соотношения.
4. **Leach R. K.** Fundamental principles of engineering nanometrology. N.Y.: Elsevier Science & Technology, 2010.
5. **Dotson C.** Fundamentals of dimensional metrology. N.Y.: Delmar Learning, 2006.
6. **ГОСТ Р 8.629–2007** ГСИ. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецеидальным профилем элементов. Методика поверки.
7. **ГОСТ Р 8.596–2002.** Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.
8. **Кононогов С. А., Голубев С. С., Лысенко В. Г.** Исследование измерительных и калибровочных возможностей средств измерений нанометрового диапазона // Законодательная и прикладная метрология. 2008. № 3. С. 19–26.

Дата принятия 11.06.2013г.

