

Восстановление волнового фронта с малыми деформациями из выборки интерферограмм с различным числом и ориентацией интерференционных полос

В.Г. Максимов, Г.В. Симонова, В.А. Тартаковский*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 4.02.2011 г.

Предложен новый подход к восстановлению фазы из интерферограммы, заключающийся в применении классического метода прослеживания интерференционных полос, но на выборке, в которой интерференционные полосы меняют число и ориентацию. Восстановленные из отдельных интерферограмм волновые фронты усредняются, и по полученной оценке судят о качестве контролируемой поверхности. Усреднение фазы из нескольких интерферограмм позволяет понизить дисперсию ошибки восстановления фазы, вызванную не только случайным шумом, но и неравномерностью покрытия апертуры интерференционными полосами, и неоднородностью источника света. Результаты проведенных модельных экспериментов показывают перспективы применения интерферометрии в нанометрологии высококачественных оптических элементов.

Ключевые слова: анализ интерферограммы, прослеживание полос, восстановление фазы; interferogram analysis, fringe tracing, phase retrieving.

Введение

Прецизионные измерения формы поверхности оптических элементов необходимы во многих приложениях, например связанных с созданием лазерных пучков дифракционного качества. Отклонение формы поверхности от заданной в современном оптическом производстве не должно превышать 0,1 длины волны, что для длин волн видимого спектра меньше 10 нм. Интерферометрия должна стать одним из направлений нанометрологии при измерении поверхностей. Актуальна, прежде всего, задача высокоточной демодуляции отдельной интерферограммы. В настоящее время точность и чувствительность интерферометрических методов значительно повысились благодаря применению оптических компенсаторов, средств электронной регистрации интерференционной картины, автоматизации измерения координат интерференционных полос и последующей обработке данных на ЭВМ. С другой стороны, альтернативная «фазосдвигающая интерферометрия» требует дополнительной взаимной юстировки отдельных интерферограмм и по этой причине, на наш взгляд, на данном этапе не перспективна.

Отличительными особенностями задачи демодуляции интерферограмм в оптической метрологии по сравнению, например, со многими другими известными методами фазометрии являются прежде всего двумерность интерферограммы, ограниченность и многосвязность области ее определения,

невыполнение условия узкополосности для полезного сигнала в фотометрическом сечении интерферограммы, требование равноточности оценки фазы во всей области определения. В этих условиях, даже при использовании прецизионных фазовых компенсаторов и высоком качестве источника, достаточно сложно получить высокую точность оценки фазы, например выше 0,01 длины волны, с помощью известных подходов.

В настоящей статье рассматривается новый комплексный подход, состоящий в применении «прослеживания интерференционных полос» (fringe tracing) для специальной выборки интерферограмм с различным числом и ориентацией интерференционных полос. Восстановленные из отдельных выборочных интерферограмм фазы усредняются, и по полученной оценке судят о качестве контролируемой поверхности. Новая процедура формирования выборки и усреднения, как и следует, понижает дисперсию ошибки восстановленной фазы, вызванную шумами на детекторе, нестабильностью схемы интерферометра, но, что особенно важно, уменьшает ошибку за счет перевода систематических помех в переменные путем сдвига их спектров относительно спектра полезного сигнала.

Методы прослеживания интерференционных полос

При сложении в интерферометре опорного и объектного полей результирующее поле имеет интенсивность I , зависящую от разности фаз слагаемых. Данная интенсивность представляет собой

* Виталий Григорьевич Максимов; Галина Владимировна Симонова; Валерий Абрамович Тартаковский.

интерферограмму в плоскости регистрации x, y . При равенстве амплитуд интерферирующих полей интерферограмму (в отн. ед.) можно представить в виде [1]:

$$I(x, y) = \alpha(x, y) + [1 + \cos\Phi(x, y)]\mu(x, y).$$

Полная фаза $\Phi(x, y) = [\Delta\varphi(x, y) + f_x x + f_y y + \text{const}] \times 2\pi/\lambda$, где λ — длина волны излучения. Разность фаз $\Delta\varphi(x, y)$ непосредственно связана с оптической разностью хода лучей $l = \Delta\varphi \frac{\lambda}{2\pi}$ и с несовпадением

эталона с контролируемой поверхностью $h = \Delta\varphi \frac{\lambda}{4\pi}$

для схем измерения в отраженных пучках.

Две составляющие несущей пространственной частоты интерферограммы f_x и f_y , обусловленные взаимным наклоном интерферирующих волновых фронтов, определяют число и ориентацию интерференционных полос в плоскости регистрации. Аддитивная $\alpha(x, y)$ и мультипликативная $\mu(x, y)$ составляющие шума в реальных экспериментах обычно отдельно не измеряются и вызывают в интерферограмме искажения при регистрации.

Проблема восстановления волнового фронта из интерферограммы заключается в определении неизвестной функции $\Delta\varphi(x, y)$ по зарегистрированной $I(x, y)$.

Если фаза $\Phi(x, y)$ не имеет экстремумов в пределах ширины интерференционной полосы, то линии максимумов и минимумов полос будут линиями уровня функции $\Phi(x, y)$, включающей в себя разность фаз интерферирующих полей. Причем $\Phi(x, y)$ изменяется на π между соседними экстремумами интерференционных полос. В отличие от экстремальных линий интерферограммы линии равной интенсивности будут линиями уровня для фазы $\Phi(x, y)$ только при постоянстве амплитуд опорного и объектного полей на всей интерферограмме.

Эти элементарные понятия лежат в основе методов прослеживания интерференционных полос. Задача восстановления фазы интерферограммы здесь состоит в выделении опорных линий с постоянным значением фазы, обычно это экстремальные (хребтовые) линии или линии центров интерференционных полос. Координаты точек опорных линий служат узлами интерполяции значений фазы по всему полю интерферограммы.

По способу выделения опорных линий методы прослеживания интерференционных полос можно разделить на методы сканирующего и адаптивного типов.

Сканирующее прослеживание

Предполагает автоматическое определение принадлежности каждой из точек интерферограммы к какой-либо экстремальной линии. Элементарным алгоритмом данного типа является построение «скелета» интерферограммы при помощи сравнения

интенсивности в текущей точке с заданным порогом. Отсчеты интерферограммы получают значение 0 или 1 в зависимости от того, больше или меньше данный отсчет выбранного порога. Операция продолжается до тех пор, пока не образуется цепочка единиц, представляющая собой опорную (экстремальную) линию.

Эффективность данного метода зависит от степени зашумленности интерферограммы, поэтому в дальнейших модификациях алгоритмов прослеживания для выделения точек опорной линии были предложены более сложные процедуры. Например, аппроксимация участка интерференционной полосы модельной гладкой функцией [2], анализ вейвлет-карт симметричных вейвлетов по сечениям интерферограммы [3] и др. Для интерферограмм с немонотонной фазой предложены построение модельной функции сравнения в двухмерном окне сканирования [2], а также сканирование вдоль осей x и y , и затем совмещение двух картин в одну [4].

В результате сканирования должно получиться бинарное изображение скелета интерферограммы в виде линий шириной в одну точку. На практике из-за присутствия шумов изображение скелета интерферограммы состоит из полос переменной ширины, а также скоплений точек и отдельных точек. Для выделения опорных линий и устранения ложных точек необходима процедура сортировки всех найденных в результате сканирования точек на предмет их соответствия опорной линии. Для сортировки, например в [2], предложены алгоритмы скелетонизации с применением логических фильтров на основе критерия восьмиточечной связанности.

После операций сортировки необходима процедура упорядочивания, т.е. интерактивная или автоматическая нумерация опорных линий. При проведении нумерации должны соблюдаться следующие правила:

- номера соседних линий должны отличаться только на $-1, 0, 1$;
- линии с различными номерами не должны соединяться или пересекаться;
- незамкнутые линии должны заканчиваться только на границе обрабатываемой области интерферограммы.

Если номер соседних линий совпадает, это является признаком наличия экстремума функции $\Phi(x, y)$, но однозначного восстановления знака функции $\Phi(x, y)$ не происходит. Если $\Phi(x, y)$ имеет несколько экстремумов, то невозможно отличить минимум от максимума без априорной информации.

Если прослеживаются одновременно максимумы и минимумы интерференционных полос, то каждой точке опорной линии присваивается значение фазы $\Phi_k(x, y) = k\pi$, где k — порядок полосы. Если прослеживаются только максимумы или только минимумы интерференционных полос, то каждой точке опорной линии присваивается значение фазы $\Phi_k(x, y) = 2k\pi$. Значения фазы $\Phi_k(x, y)$ служат узлами интерполяции при построении фазовой поверхности $\Phi(x, y)$.

Алгоритмы автоматической сортировки и упорядочивания опорных линий имеют достаточно сложную структуру и занимают значительное время в процессе обработки интерферограммы. Для сортировки и корректировки опорных линий в практическом приложении эти алгоритмы дополняются редактированием с участием оператора [5].

Адаптивное прослеживание

Существуют алгоритмы, в которых каждая опорная линия строится начиная от стартовой точки, по траектории, направление которой в каждом шаге выбирается исходя из некоего критерия соответствия координат текущей точки центру или экстремуму интерференционной полосы. При этом модель сравнения, связанная зависимостью с параметрами интерференционной полосы, корректируется в сторону наилучшего соответствия текущему участку прослеживаемой полосы, т.е. адаптируется к изменяющимся условиям. Тип такого прослеживания можно обозначить как адаптивный.

Направления траектории прослеживания могут задаваться различными способами, например с использованием конечного набора моделей полосы определенных размеров и конфигурации [6]. При этом минимум суммы среднеквадратических отклонений интенсивности интерферограммы от модели в опорных точках определяет выбор текущего направления опорной линии. В качестве критерия выбора направления также может выступать максимум коэффициента корреляции между локальной выборкой реальной полосы и моделью идеальной полосы [7].

Положение стартовой точки и номер опорной линии могут задаваться интерактивно оператором, а также рассчитываться автоматически в заданном сечении [8]. Причем, если в интерферограмме присутствуют одновременно разомкнутые и замкнутые полосы, таких сечений может быть несколько [9].

В результате адаптивного прослеживания опорные линии состоят из отдельных упорядоченных последовательностей точек, и в процедурах сортировки нет необходимости. Кроме того, при адаптивном прослеживании обрабатываются не все отсчеты интерферограммы, а только находящиеся в непосредственной близости от опорной линии. Эти два фактора определяют значительное снижение времени обработки интерферограммы адаптивным прослеживанием по сравнению со сканированием.

Полученная в результате прослеживания ступенчатая функция $\Phi_k(x, y)$ интерполируется между соседними линиями какой-либо модельной зависимостью. Для круглых интерферограмм традиционно применяются полиномы Цернике [10]. Полиномы ортогональны на единичном круге и образуют полную систему. По этой причине коэффициент каждого последующего члена разложения не зависит от предыдущих и при увеличении числа членов разложения погрешность аппроксимации монотонно убывает. Для определения коэффициентов разложения применяется метод наименьших квадратов.

Минимизируется сумма квадратов отклонений отрезка ряда полиномов Цернике от значений фазы $\Phi_k(x, y)$, заданной в точках отсчетов на опорных линиях.

Методы прослеживания интерференционных полос широко применяются в практике оптического контроля и включены в коммерческие пакеты прикладных программ для анализа интерферограмм. Однако этим методам присущ ряд характерных недостатков, которые необходимо учитывать при разработке алгоритмов демодуляции интерферограмм.

Сам принцип анализа интерферограмм по опорным линиям связан с потерей исходной информации (рис. 1).

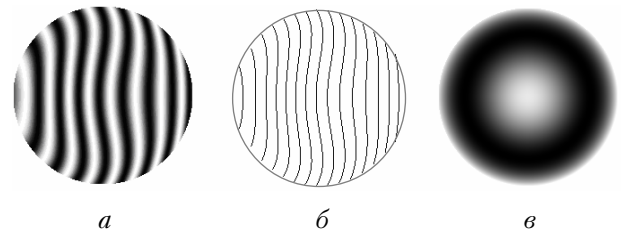


Рис. 1. Прослеживание интерференционных полос: *a* – исходная интерферограмма; *b* – опорные линии; *в* – полутоновая карта восстановленного волнового фронта

Если исходное количество информации в интерферограмме можно оценить как $N \times b$ бит, где N – количество отсчетов интерферограммы, b – разрядность отсчета, в восстановленной фазе – также $N \times b$ бит, то после прослеживания полос остается N бит, так как опорная линия – это единица на фоне нулей. Значит, сначала информация теряется, а затем восстанавливается на основе априорных моделей фазы. Это неоптимально и приводит к потере точности.

Сдвиг фазы между соседними точками в поперечном сечении интерференционной полосы составляет $2\pi/m$, где m – число отсчетов в пределах периода интерференционной полосы, что соответствует искажению волнового фронта λ/m . Величина λ/m обычно служит для оценки потенциальной точности методов прослеживания интерференционных полос. Например, в [11] утверждается, что точность восстановления волнового фронта путем прослеживания интерференционных полос не превышает $\lambda/10$. Однако, как показано в [7, 12, 13], позиционирование опорных линий в вещественных координатах, а не с точностью до отсчета, позволяет обрабатывать интерферограммы методом прослеживания интерференционных полос с точностью, существенно превышающей ограничение λ/m . Таким образом, интерполяция есть имманентное свойство адаптивного алгоритма и исходная частота дискретизации не является жестким ограничением.

Атгестационный и тем более технологический контроль имеет дело с зашумленными интерферограммами. Очевидно, что фаза, восстановленная тем или иным способом из отдельной интерферограммы, будет включать в себя ошибку, обусловленную зарегистрированными детектором шумами.

Однако можно организовать выборочный ансамбль интерферограмм и, соответственно, восстановленных из них фаз, которые имеют статистически независимые искажения. Для этого необходимо изменить число и ориентацию интерференционных полос таким образом, чтобы полезный сигнал попадал в непересекающиеся области пространственных частот, шум в которых по определению некоррелируем. Усреднение фаз, восстановленных из интерферограмм, полученных подобным способом, должно понизить дисперсию оценки фазы, связанную прежде с регулярными искажениями, создаваемыми источниками света, с неравномерным заполнением исследуемого поля интерференционными полосами, с конструктивными особенностями интерферометра. Влияние спеклов и нежесткости конструкции, нестабильности внешних условий также подавляются, но уже в силу обычных причин.

Из рассмотренных методов прослеживания интерференционных полос для обработки интерферограмм метод адаптивного прослеживания наиболее подходит для осуществления указанной стратегии измерений, основанной на усреднении восстановленных фаз по выборочному ансамблю интерферограмм. Работа метода только в координатной области дает однозначную оценку фазы без подбора параметров расчета при обработке интерферограмм с различным количеством и ориентацией интерференционных полос и достаточно устойчивую в условиях аддитивного шума и неоднородности фона освещения [7].

2. Моделирование восстановления фазы из интерферограммы

Для оценки эффективности выбранной стратегии был проведен ряд замкнутых численных экспериментов по восстановлению фазы из интерферограмм. При восстановлении использовалась программа, разработанная авторами [13] для измерительного комплекса высокоточного оптического контроля.

Зададим опорный волновой фронт в виде плоскости, а объектный волновой фронт в виде 17-го члена ряда разложения по полиномам Цернике [10], тогда их разность будет равна: $\Phi_0(x, y) = z(4x^3y - 4xy^3)$, где $-1 \leq x \leq 1$; $-1 \leq y \leq 1$; z – амплитудный коэффициент. Разность интерферирующих волновых фронтов $\Phi_0(x, y)$ приведена на рис. 2. Затем на квадратной матрице с числом отсчетов $N \times N$ построим модель интерферограммы:

$$I_{i,j} = A_{i,j} \left[\left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} [\Phi_0(x_j, y_i) + f_x x_j + f_y y_i] \right) \right) \mu_{i,j} + \alpha_{i,j} \right],$$

где λ – длина волны; $i = 0 \dots N - 1$, $j = 0 \dots N - 1$; f_x, f_y – имеют смысл коэффициентов наклона ближайшей плоскости; A – апертурная функция,

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1, & (x_j, y_i) \in a \\ 0, & (x_j, y_i) \notin a \end{cases}, \quad a - \text{единичный круг с центром}$$

в точке $x = 0, y = 0$; $\alpha_{i,j}$ и $\mu_{i,j}$ – аддитивная и мультипликативная составляющие шумов интерферограммы.

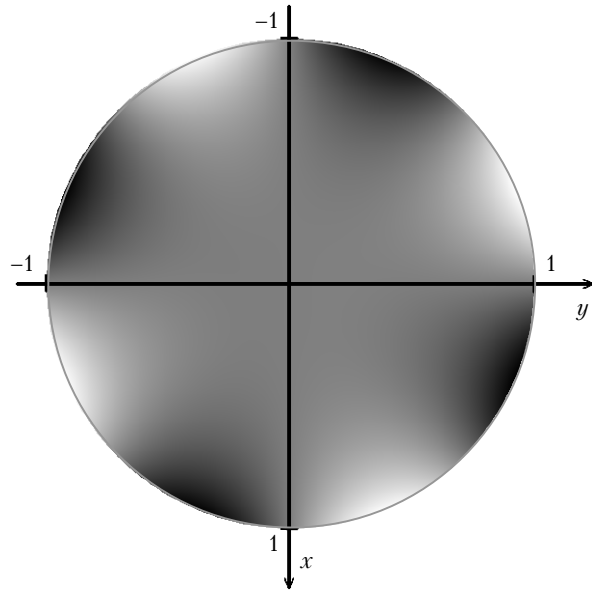


Рис. 2. Полутоновая карта разности опорного и объектно-волновых фронтов для моделирования интерферограмм

Введем в модель интерферограммы следующие искажения: аддитивный шум $s(x, y) = \text{rnd}(\tau)$, который в каждом отсчете добавляет к интенсивности интерферограммы равномерно распределенную величину в диапазоне $[0; \tau]$; низкочастотный мультипликативный шум, возникающий за счет неоднородности источника света в виде пучка Гаусса

$$g(x, y) = \exp \left(\frac{-((x - x_c)^2 + (y - y_c)^2)}{4\omega^2} \right) \text{ с центром в точке } (x_c, y_c) \text{ и полушириной } \omega;$$

паразитную интерференцию, вызванную переотражением объектного волнового фронта от нерабочей поверхности интерферометра:

$$p(x, y) = b \cos(2\pi(w_0 + w_1x + w_2y + w_3(x^2 + y^2))/\lambda),$$

где b – амплитудный коэффициент; w_i – коэффициент, формирующий паразитный волновой фронт.

Для модельного эксперимента зафиксируем следующие параметры:

$$z = \lambda/10; \tau = 0,5; \omega = 1; x_c = 0,1; y_c = 0,15;$$

$$b = 0,1; w_0 = \lambda/2; w_1 = 2\lambda; w_2 = 4\lambda; w_3 = 30\lambda.$$

По характеру искажений определим типы выборок модельных интерферограмм:

1) интерферограммы со случайным искажением (рис. 3, а): $\alpha_{i,j} = s(i, j)$, $\mu_{i,j} = 1$;

2) интерферограммы с постоянным искажением (рис. 3, б): $\alpha_{i,j} = p(x_i, y_j)$, $\mu_{i,j} = g(x_i, y_j)$;

3) интерферограммы со смешанным искажением (рис. 3, в): $\alpha_{i,j} = s(i, j) + p(x_i, y_j)$, $\mu_{i,j} = g(x_i, y_j)$.

Внутри апертуры A поверхность Φ_0 имеет пиковое и среднеквадратическое отклонения: $PV = 0,2\lambda$,

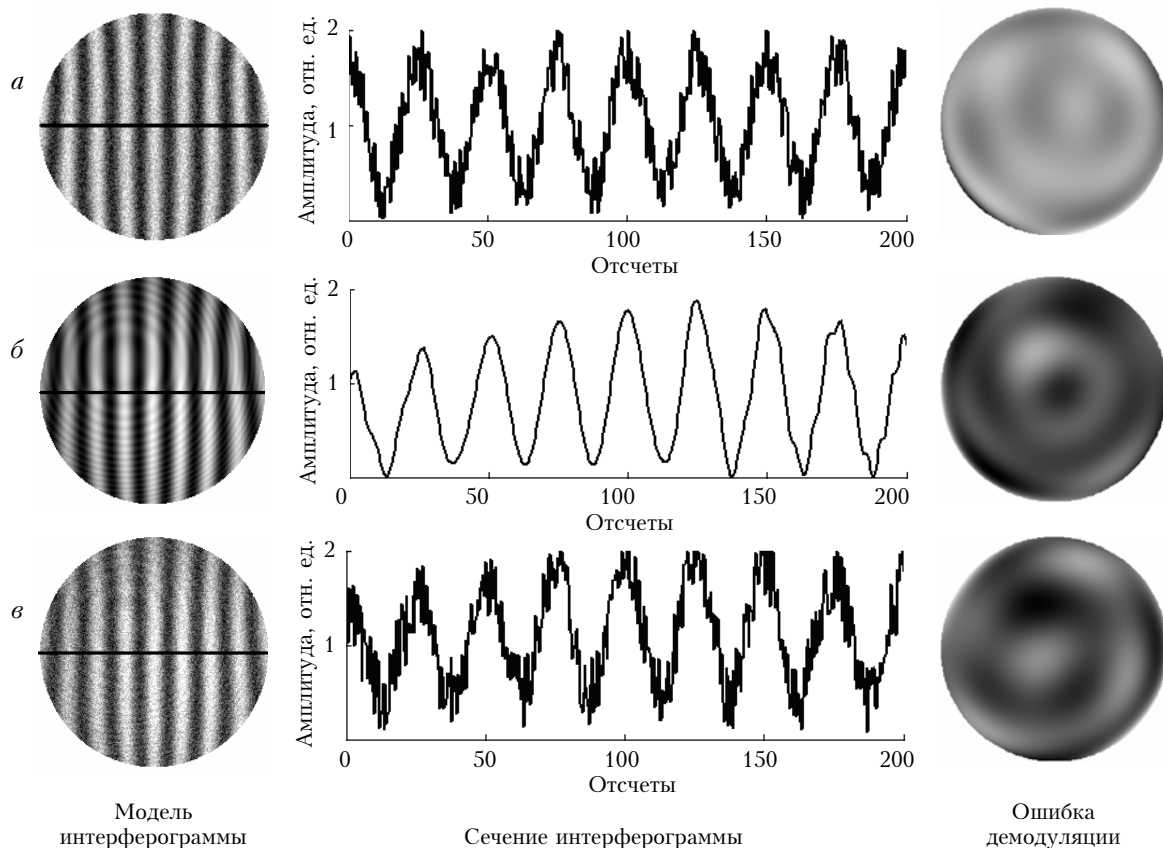


Рис. 3. Модель, сечение и ошибка демодуляции для интерферограмм со случайным (а), постоянным (б) и смешанным (в) искажениями

$RMS = 0,031\lambda$. Максимальное искривление интерференционной полосы составляет десятую долю ее ширины, и визуально интерференционные полосы неотличимы от прямолинейных (см. рис. 3). При этом наличие шумовой составляющей в интерферограмме еще более усложняет обработку ее вручную, как, например, в [8].

Путем прослеживания интерференционных полос восстановим форму поверхности волнового фронта в виде поверхности Φ' . Далее найдем разность заданной и восстановленной поверхностей $\Delta\Phi = \Phi_0 - \Phi'$, т.е. искажения, внесенные в восстановленную фазу при демодуляции интерферограммы (см. рис. 3).

Для n количества отсчетов интерферограммы внутри апертуры A средний квадрат отклонения

$$\text{восстановленной фазы от начальной } \varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{q=0}^{n-1} \Delta\Phi_q^2}$$

будет служить численной оценкой качества восстановления.

Специфика восстановления фазы методом прослеживания интерференционных полос противоречива. С одной стороны, при большем количестве узлов достигается более высокая точность интерполяции. Для этого используют большее число интерференционных полос, увеличивая наклон между интерферирующими волновыми фронтами. С другой стороны, сужение полос при постоянном числе

отсчетов интерферограммы приводит к уменьшению числа отсчетов в пределах интерференционной полосы, что потенциально ухудшает оценку фазы. На рис. 4 приведена зависимость ошибки восстановленной фазы от количества полос интерферограммы на матрице 200×200 отсчетов.

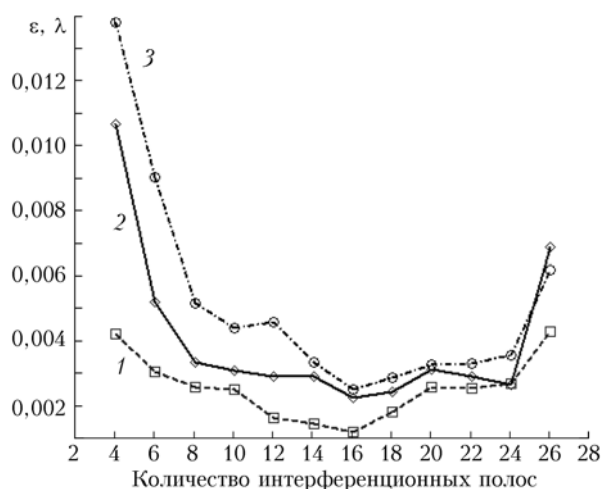


Рис. 4. Среднеквадратическая ошибка восстановленной фазы интерферограммы, искаженной шумами: 1 – аддитивный случайный шум; 2 – мультипликативный низкочастотный шум и паразитная интерференция; 3 – аддитивный случайный шум, мультипликативный низкочастотный шум и паразитная интерференция

Зависимость показывает, что 16 интерференционных полос обеспечивают минимум погрешности фазы для заданного числа отсчетов.

При заданном числе интерференционных полос

$$f = 2\sqrt{f_x^2 + f_y^2} \text{ и величине угла } \psi = \tan^{-1}\left(\frac{f_y}{f_x}\right) \text{ наклона}$$

полос относительно оси x легко найти составляющие f_x и f_y для моделирования интерферограмм. Задавая количество и угол наклона интерференционных полос, для одной и той же начальной фазовой поверхности Φ_0 получаем серию из k интерферограмм. Значения восстановленных фаз Φ'_i ($i = 1 \dots k$) из каждой интерферограммы составляют выборку

$$\text{для получения оценки фазы } \bar{\Phi} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Phi'_i \text{ как выбо-}$$

рочного среднего. Для каждой из восстановленных фаз Φ'_i найдем ε_i — средний квадрат ее отклонения от Φ_0 , а по массиву ε_i найдем среднюю ошибку

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \varepsilon_i \text{ и разброс ошибок } \sigma = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\bar{\varepsilon} - \varepsilon_i)^2}.$$

Соответственно для оценки фазы $\bar{\Phi}$ получим $\bar{\varepsilon}$ — средний квадрат ее отклонения от Φ_0 . Для оценки эффективности усреднения введем отношение $E = \bar{\varepsilon} / \bar{\Phi}$.

Результаты обработки выборки, состоящей из 12 интерферограмм с размером матрицы 200×200 отсчетов, приведены в табл. 1.

Усреднение восстановленной фазы без изменения числа интерференционных полос и их ориентации (верхняя часть табл. 1) имеет смысл только при наличии изменяющихся во времени случайных искажений, например шума фотодетектора. Сравнение результатов усреднения восстановленной фазы по выборке с изменением количества полос и постоянным углом их наклона (средняя часть табл. 1) с результатами по выборке с изменением наклона полос при постоянном их количестве (нижняя часть табл. 1) показывает, что в данном эксперименте наибольший эффект снижения погрешности восстановления фазы достигается при изменении наклона полос при постоянном их количестве в каждой выборочной интерферограмме.

Размер матрицы фотодетектора 200×200 не является значительным с точки зрения современных приборов регистрации интерферограмм и применялся в модельном эксперименте исключительно для ускорения времени расчета. Для более высоких разрешений интерферограммы в табл. 2 приведены результаты усреднения фаз, восстановленных из четырех интерферограмм с постоянным числом полос при различных углах наклона полос.

Таблица 1

Средняя ошибка $\bar{\varepsilon}$, разброс ошибок σ , ошибка усредненной фазы $\bar{\varepsilon}$, эффективность усреднения E для фаз, восстановленных по выборке интерферограмм

Угол наклона ψ и количество полос f в серии $i = 0 \dots 11$ интерферограмм	Результаты обработки серии интерферограмм	Условия формирования серии интерферограмм		
		интерферограммы с искажением		
		случайным $\alpha = s, \mu = 1$	постоянным $\alpha = p, \mu = g$	смешанным $\alpha = s + p, \mu = g$
$\psi_i = 0;$ $f_i = 16$	$\bar{\varepsilon}, \lambda$	$1,373 \cdot 10^{-3}$	$2,234 \cdot 10^{-3}$	$2,417 \cdot 10^{-3}$
	σ, λ	$1,956 \cdot 10^{-4}$	0	$2,102 \cdot 10^{-4}$
	$\bar{\varepsilon}, \lambda$	$5,597 \cdot 10^{-4}$	$2,234 \cdot 10^{-3}$	$1,681 \cdot 10^{-3}$
	E	2,453	1	1,438
$\psi_i = 0;$ $f_i = 4 + i \cdot 2$	$\bar{\varepsilon}, \lambda$	$2,538 \cdot 10^{-3}$	$4,024 \cdot 10^{-3}$	$5,165 \cdot 10^{-3}$
	σ, λ	$9,894 \cdot 10^{-4}$	$2,737 \cdot 10^{-3}$	$3,799 \cdot 10^{-3}$
	$\bar{\varepsilon}, \lambda$	$1,322 \cdot 10^{-3}$	$1,833 \cdot 10^{-3}$	$2,376 \cdot 10^{-3}$
	E	1,920	2,195	2,174
$\psi_i = i\pi/12;$ $f_i = 16$	$\bar{\varepsilon}, \lambda$	$1,540 \cdot 10^{-3}$	$2,333 \cdot 10^{-3}$	$2,821 \cdot 10^{-3}$
	σ, λ	$1,895 \cdot 10^{-4}$	$4,328 \cdot 10^{-4}$	$6,809 \cdot 10^{-4}$
	$\bar{\varepsilon}, \lambda$	$3,906 \cdot 10^{-4}$	$6,834 \cdot 10^{-4}$	$9,068 \cdot 10^{-4}$
	E	3,942	3,414	3,111

Таблица 2

Средняя ошибка $\bar{\varepsilon}$, разброс ошибок σ , ошибка усредненной фазы $\bar{\varepsilon}$, эффективность усреднения E для фаз, восстановленных по выборке интерферограмм с постоянным искажением ($\alpha = p, \mu = g$), в зависимости от количества отсчетов в матрице интерферограммы

Угол наклона ψ и количество полос f в серии $i = 0 \dots 3$ интерферограмм	Результаты обработки серии интерферограмм	Количество отсчетов в матрице интерферограммы			
		256×256	512×512	1024×1024	2048×2048
$\psi_i = 0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{2};$ $f_i = 16$	$\bar{\varepsilon}, \lambda$	$1,045 \cdot 10^{-3}$	$8,206 \cdot 10^{-4}$	$6,897 \cdot 10^{-4}$	$6,385 \cdot 10^{-4}$
	σ, λ	$1,235 \cdot 10^{-4}$	$8,759 \cdot 10^{-4}$	$1,930 \cdot 10^{-4}$	$1,999 \cdot 10^{-4}$
	$\bar{\varepsilon}, \lambda$	$4,977 \cdot 10^{-4}$	$3,461 \cdot 10^{-4}$	$2,893 \cdot 10^{-4}$	$2,769 \cdot 10^{-4}$
	E	2,1	2,371	2,384	2,306

Табл. 2 наглядно демонстрирует снижение средней ошибки и ошибки усредненной фазы с увеличением разрешения.

Заключение

Для успешного выполнения требований современного производственного контроля оптических элементов необходимо применять новую стратегию контрольно-измерительного эксперимента, обеспечивающего анализ зашумленных интерферограмм с усреднением фаз, восстановленных из нескольких интерферограмм, для одной и той же поверхности. При этом интерферограммы должны отличаться числом и ориентацией интерференционных полос. Это позволит минимизировать ошибку восстановления в условиях шумов, переменных во времени а также уменьшить влияние систематических искажений, например неоднородности фронта источника света и паразитной интерференции. Применение усреднения, например 12 восстановленных фаз в модельном эксперименте, снижает погрешность восстановления в 3–4 раза.

При пиковом $0,1\lambda$ и среднеквадратическом $0,031\lambda$ отклонениях поверхности волнового фронта от номинала, что на длине волны излучения He–Ne-лазера соответствует 63,0 и 19,53 нм, среднеквадратическое отклонение при размере матрицы детектора 1024×1024 и выше достигает 0,7 нм, а при усреднении по четырем интерферограммам снижается более чем в 2 раза. Более детальное исследование влияния искажающих факторов интерферограмм на погрешность восстановления фазы еще предстоит выполнить, но очевидно, что результаты проведенных в работе модельных экспериментов показывают перспективы применения интерферометрии в нанометрологии высококачественных оптических элементов.

V.G. Maximov, G.V. Simonova, V.A. Tartakovsky. Reconstruction of wave front with small deformations from a sample of interferograms with different number and orientation interference fringes.

The new approach to restoration of a phase from interferogram, consisting in application of a classical method of interference fringe tracing on the sample, in which interference fringes change number and orientation is offered. Wave fronts restored from separate interferograms, are averaged, and the quality of the studied surface is estimated. Averaging of a phase from several interferograms allows one to lower the dispersion of an error of restoration of the phase, causing not only randomly noises, but also non-uniformity of a covering of the aperture by interference fringes, and heterogeneity of a light source. Results of the modeling experiments show prospects application interferometry in nanometrology of high-quality optical elements.

1. Витриченко Э.А., Лукин В.П., Пушиной Л.А., Тартаковский В.А. Проблемы оптического контроля. Новосибирск: Наука, 1990. 351 с.
2. Крайнюков Н.И., Храмов А.Г. Выделение центров полос на интерферограмме // Компьютерная оптика. 1992. № 10–11. С. 150–159.
3. Беляков А.В. Анализ картин интерференционных полос с использованием метода выделения особенностей вейвлет-карт симметричных вейвлетов // Оптик. ж. 2006. Т. 73, № 3. С. 40–44.
4. Anand A. Tracing of interference fringes using average gray value and simultaneous row and column scan // Opt. & Laser Technol. 2003. V. 35, N 2. P. 73–79.
5. Горшков В.А., Панаев А.Ю., Подобранный А.В. Программное обеспечение обработки интерферограмм для технологических целей // Оптик. ж. 2002. Т. 69, № 2. С. 54–59.
6. Khadakkar A.G., Jyothi V., Narayanan R. Fringe tracing by image processing // Opt. Eng. 1994. V. 33, N 6. P. 1872–1875.
7. Maximov V.G., Tartakovsky V.A., Chudinov S.A. Adaptive algorithm for interference fringe tracing // Proc. SPIE. 2004. V. 5743. P. 271–281.
8. Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Маточкин А.Е., Максимов В.Г., Тартаковский В.А., Чудинов С.А. Интерферометрия оптических поверхностей по ньютоновским полосам // Автометрия. 2004. Т. 40, № 6. С. 33–45.
9. Budzinski J. SNOP: a method for skeletonization of a fringe pattern along the fringe direction // Appl. Opt. 1992. V. 31, N 16. P. 3109–3113.
10. Wyant J.C., Creath K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology // Appl. Opt. and Opt. Eng. / R. Shannon, J. Wyant, eds. New York: Academic Press, 1992. V. 11. P. 28–39.
11. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 252 с.
12. Maximov V.G., Tartakovsky V.A., Chudinov S.A. Edge effect reduction for interference fringe tracer // Proc. SPIE. 2005. V. 6160. P. 616012-1–4.
13. Полещук А.Г., Насыров Р.К., Маточкин А.Е., Черкашин В.В., Максимов В.Г., Тартаковский В.А. Измерительный комплекс для высокоточного оптического контроля // Сб. трудов 9-й Междунар. конф. «Прикладная оптика–2010». СПб., 2010. Ч. 2. С. 129–136.