

**КОРРЕКЦИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОЛНОЙ ФАЗЫ
В ЦЕЛОЧИСЛЕННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ*****В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Е. В. Картавых***Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск**E-mail: vig@edu.nstu.ru*

Предложена модификация метода целочисленной интерферометрии, применяемого для устранения искажений профиля интерференционных полос, вызванных погрешностями при регистрации и обработке интерферограмм.

Введение. Развитие современных технологий невозможно без совершенствования высокоточных измерительных систем. Основным элементом лазерных интерференционных систем является интерферометр, осуществляющий сравнение объектного и опорного волновых полей [1]. Поле яркости $I(x, y)$, возникающее при интерференции опорного и объектного оптических полей описывается выражением

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\Phi(x, y)), \quad (1)$$

где $A(x, y)$ – средняя яркость; $B(x, y)$ – амплитуда интерференционных полос; $\Phi(x, y)$ – поле фазовых разностей интерферирующих оптических полей (полная фаза):

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi N(x, y). \quad (2)$$

Здесь $N(x, y)$ – число целых периодов 2π , укладывающихся в полную оптическую разность фаз $\Phi(x, y)$ и зависящих от геометрии схемы интерферометра и длины волны излучения лазера λ ; $\phi(x, y)$ – локальная фаза, являющаяся дробной частью фазы $\Phi(x, y)$. Далее для упрощения изложения координаты (x, y) опускаем.

Определение целого числа периодов N называется устранением фазовой неоднозначности [2]. Существует большое количество алгоритмов, реализующих данный подход [3, 4]. Как правило, эти алгоритмы основаны на оценке разрывов локальных фаз ϕ и выборе пути пространственного интегрирова-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-08-00616а).

ния таким образом, чтобы область интегрирования не содержала разрывы [3], либо суммировании поправочных коэффициентов, пропорциональных количеству разрывов, с учетом их знака [3]. Очевидно, что в случае ошибки определения местоположения скачков происходит накопление ошибок и в связи с этим ограничение возможного диапазона измерений. Кроме того, данные методы не позволяют обнаружить скачок фазы, превышающий 2π , что является принципиальным ограничением одночастотных интерференционных систем. В работе [5] предложен способ целочисленной интерферометрии, позволяющий реконструировать полную фазу Φ непосредственно по значениям локальных фаз ϕ , используя несколько длин волн лазера. Такой подход способствует устранению отмеченных недостатков, но весьма чувствителен к ошибкам измерения локальных фаз ϕ .

Вместо разности фаз интерферирующих волн Φ удобно ввести в рассмотрение пропорциональную ей величину Λ – оптическую разность хода (OPD – Optical Path Difference) (далее – разность хода). Полная разность хода Λ связана с полной фазой Φ :

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\pi} \Phi = \frac{\lambda}{2\pi} (\phi + 2\pi N) = \delta + \lambda N, \quad (3)$$

где δ – локальная разность хода, соответствующая локальной фазе ϕ (эта величина изменяется от нуля до цены интерференционной полосы в длинах волн).

Измеренные значения локальных фаз ϕ переводятся в локальные разности хода δ , которые выражаются в виде целых значений с числом знаков, обеспечивающих необходимую точность измерения.

Для определения OPD требуется найти решение целочисленной системы сравнений

$$\begin{cases} \Lambda \equiv \delta_1 \pmod{m_1}, \\ \Lambda \equiv \delta_2 \pmod{m_2}. \end{cases} \quad (4)$$

Решение этой системы можно представить в виде траектории на комплексной плоскости (δ_1, δ_2) (рис. 1). Максимальная длина траектории $L_{\max} = m_1 \times m_2 - 1$ задает динамический диапазон однозначного определения Λ_{\max} . Расстояние между соседними диагоналями траектории $\delta L = 1$. Если $\Lambda < \Lambda_{\max}$, то $\delta L > 1$. Например, если $m_1 = 633$, $m_2 = 488$ (что соответствует линиям генерации He-Ne- и Ar-лазеров) и $L_{\max} = 10m_2$, то $\delta L = 52$.

При неточном определении исходных значений $\delta_{1,2}^* = \delta_{1,2} + \varepsilon_{1,2}$ решение системы сравнений (4) приводит к грубым ошибкам, так как разность хода Λ^* , соответствующая δ_1^* и δ_2^* , на комплексной плоскости будет больше Λ_{\max} . Если точка на комплексной плоскости, соответствующая δ_1^* и δ_2^* , отклоняется от ближайшей диагонали траектории на величину не более $\delta L/2$, данную ошибку можно компенсировать [5].

Наибольший вклад в искомую погрешность дает отклонение профиля интерференционных полос от вида выражения (1). Чаще всего отклонение этой зависимости от косинусоидальной формы вызывается спеклообразной структурой изображения при когерентном освещении [6].

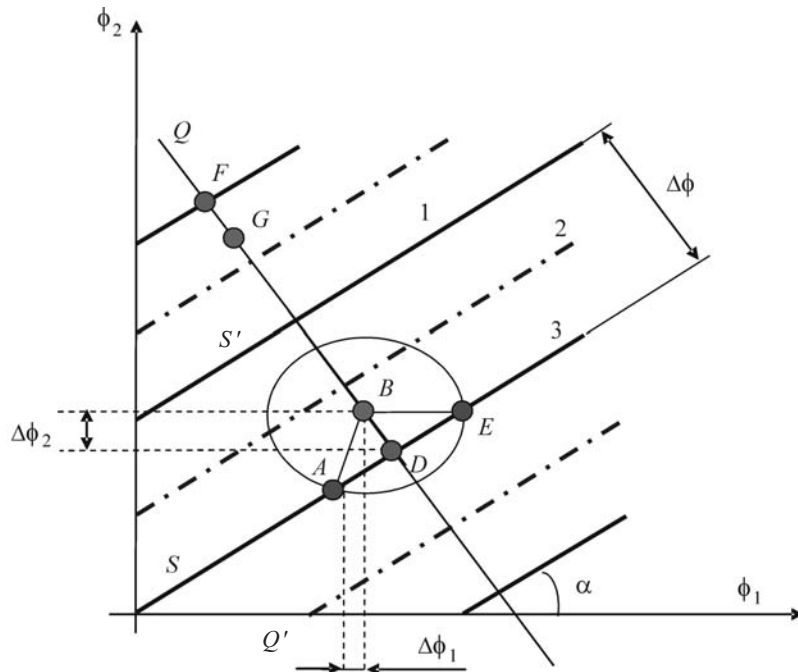


Рис. 1. Траектория интерференционного сигнала на комплексной плоскости

Целью предлагаемой работы является модификация базового метода для повышения его устойчивости к ошибкам измерений, связанным с использованием профиля интерференционных полос.

Модификация базового метода. Для устранения ошибок при искажении профиля полос необходимо поэтапно:

1. Вычислить разность локальных разностей хода: $\Delta = \delta_1 - \delta_2$.
2. Найти изотропные области, т. е. области интерферограммы, в которых выполняется условие

$$\Delta = \text{const.} \tag{5}$$

Следует отметить, что погрешности определения границ изотропных областей, возникающие в отдельных точках и обусловленные малым соотношением сигнал/шум разностей хода, носят локальный характер и не распространяются на соседние области.

3. Вычислить оценку разности в изотропных областях. В отсутствие шумов разность Δ является кусочно-постоянной функцией независимо от закона изменения OPD. Без потери устойчивости на этапе коррекции допустимо отклонение оценки разности на величину, не превышающую половины расстояния между диагоналями 1 и 3 линии сигналов 2 (см. рис. 1).

4. Сформировать фазовые плоскости (Δ_1, δ_2) , (Γ_1, δ_2) и (δ_1, Γ_2) по следующему правилу:

$$\Gamma_1 = \delta_2 + \Delta_j; \quad \Gamma_2 = \begin{cases} \delta_1 + \Delta_j, & \text{если } \delta_1 - \Delta_j \geq 0, \\ \delta_1 - \Delta_j + m_2 & \text{иначе.} \end{cases} \tag{6}$$

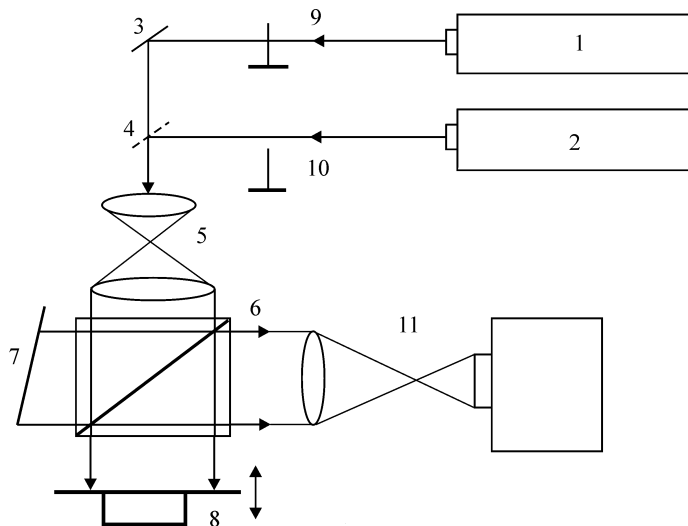


Рис. 2. Оптическая схема интерферометра: 1, 2 – лазеры; 3, 7 – зеркала; 4 – полупрозрачное зеркало; 5 – коллиматор; 6 – светоделительный кубик; 8 – подвижное опорное зеркало; 9, 10 – прерыватели луча; 11 – устройство ввода

5. Скорректировать разности хода на фазовой плоскости и определить полную разность хода (OPD) по основному алгоритму (4).

Экспериментальная проверка производилась путем измерения рельефа эталонного объекта основным и предлагаемым способами [1]. Оптическая схема лазерной интерферометрической системы приведена на рис. 2.

На первом этапе регистрировалось несколько интерферограмм с различными фазовыми сдвигами. Величина фазового сдвига, вносимого между экспозициями интерферограмм, равна $\lambda/10$. Регистрация интерферограмм вы-

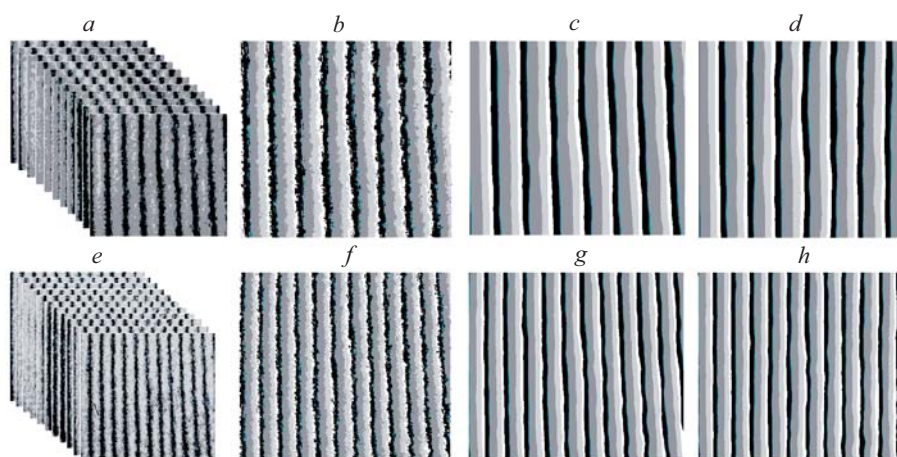


Рис. 3. Результаты первого этапа алгоритма коррекции: интерферограммы (a, e), локальные фазы (b, f), локальные фазы после фильтрации для длин волн 633 нм (c, g) и 488 нм (d, h)

полнялась следующим образом: сначала поочередно регистрировались интерферограммы с разными длинами волн, затем изменялось положение опорного зеркала 8. Всего было зарегистрировано 22 интерферограммы: 11 – с длиной волны 633 нм и 11 – с длиной волны 488 нм (рис. 3, *a, e*). На рис. 3, *b, f* показаны результаты вычисления локальных фаз. Для снижения дестабилизирующих факторов выполнялась фильтрация спекл-шумов [4] (рис. 3, *c, g*) и устранение волновых aberrаций оптической схемы интерферометра [5] (рис. 3, *d, h*) соответственно.

На втором этапе вычислялись локальные фазы ϕ_1 и ϕ_2 согласно методике, изложенной в [3]. Фазовые профили интерферограмм ϕ_1 и ϕ_2 для длин волн 633 и 488 нм показаны на рис. 4, *a, b* соответственно и разность фаз между ними на рис. 4, *c*. На основе вычисленной разности фаз $\Delta\phi$ определялись изофазные области ($\Delta\phi = \text{const}$) и синтезированные фазы ϕ_1 и ϕ_2 .

На третьем этапе производилось формирование фазовых плоскостей (ϕ_1, ϕ_2) по базовому методу, фазовых плоскостей (ϕ_1, ϕ_2) и (ϕ_1, ϕ_2) и вычис-

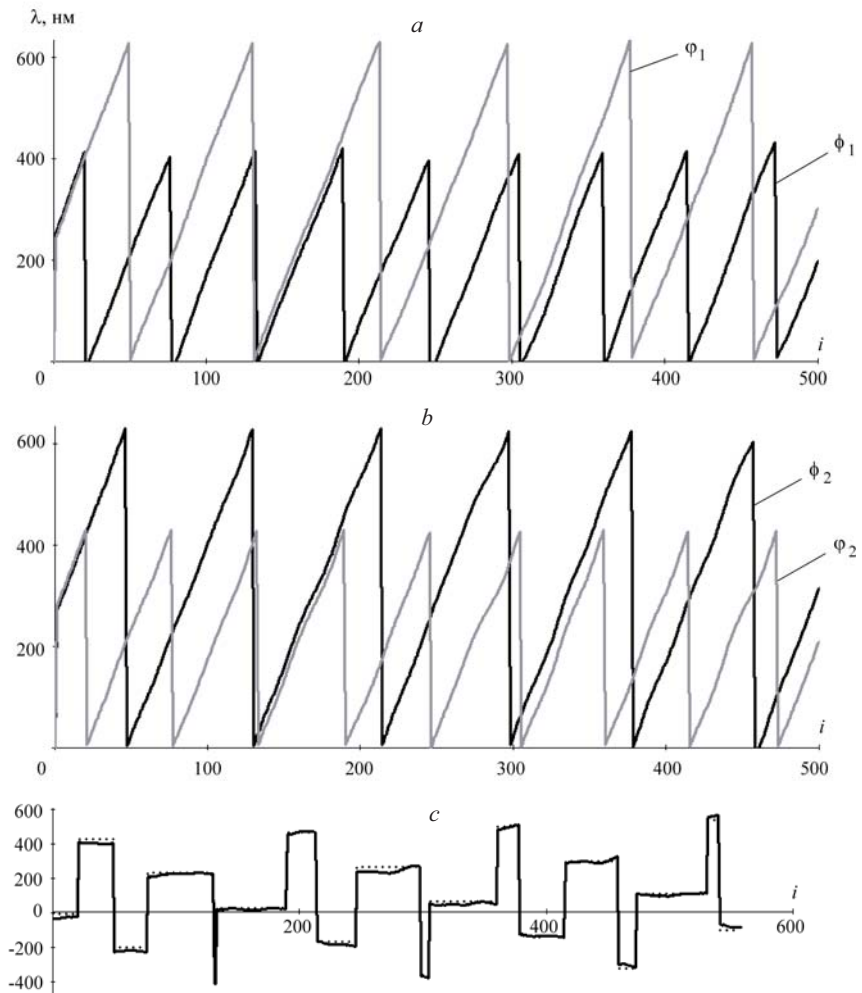


Рис. 4. Фазовые профили второго этапа: профили фаз ϕ_1, ϕ_2 и соответствующие им синтезированные фазы ϕ_1, ϕ_2 (*a, b*), разность фаз $\Delta\phi$ (*c*)

ление соответствующих им полных фаз Φ , Φ_1 и Φ_2 по модифицированному методу (рис. 5, *a–f*). Результаты коррекции траектории полной фазы до ближайшей разрешенной диагонали линии сигналов (по правилам (4)–(6)) для базового и модифицированного методов показаны на рис. 5, *b, d, f*. Из рис. 5, *b* видно, что результирующая погрешность полной фазы после устранения фазовой неоднозначности для базового метода много больше длины волны λ из-за наличия грубых ошибок, вызванных искажением профиля интерференционных полос при коррекции фазы. Погрешность измерения полной фазы после устранения фазовой неоднозначности по модифицированному методу не превышает погрешности измерения локальных фаз, что следует из рис. 5, *d, f*.

Абсолютная погрешность измерения полной фазы, полученной усреднением фаз Φ_1 и Φ_2 , не превышает 2–5 нм. Среднеквадратическая погреш-

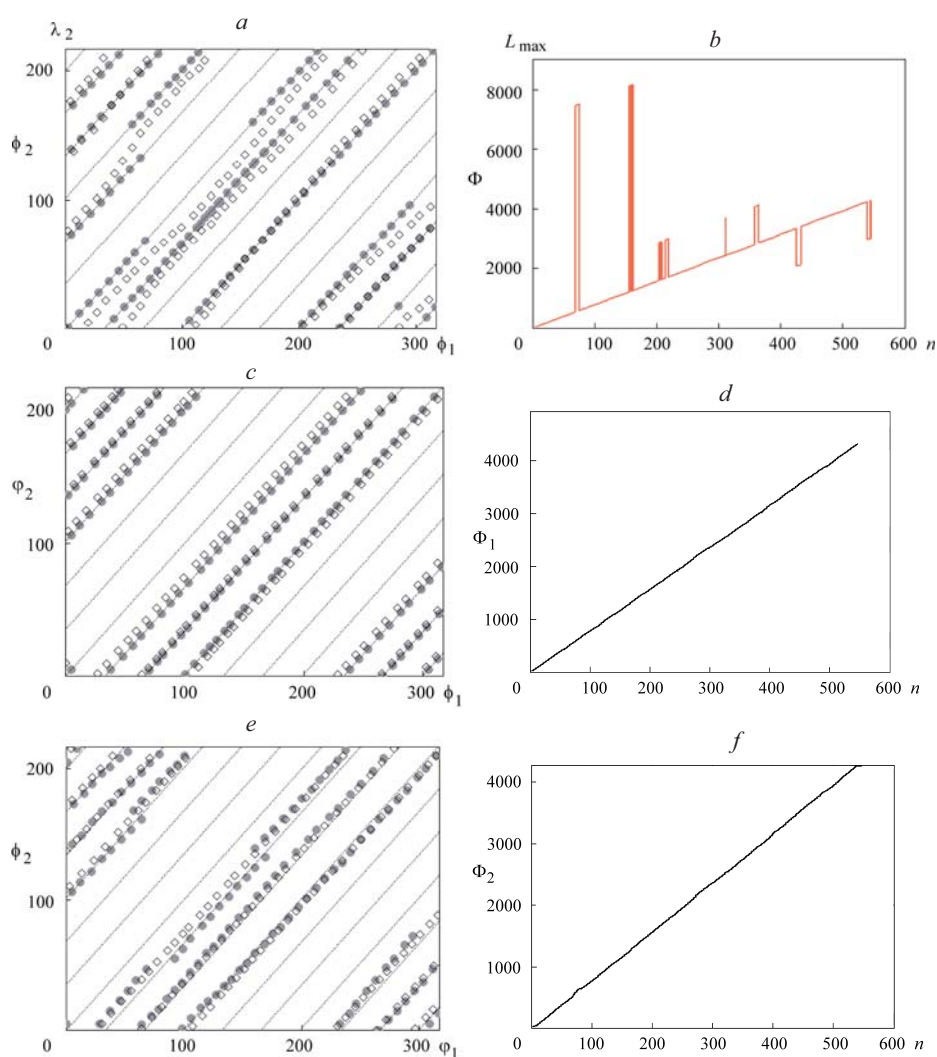


Рис. 5. Результаты вычислений третьего этапа: фазовые плоскости (ϕ_1, ϕ_2) (*a*), (ϕ_1, ϕ_2) (*c*), (ϕ_1, ϕ_2) (*e*); полная фаза Φ (*b*), Φ_1 (*d*), Φ_2 (*f*)

ность измерения полной фазы для модифицированного метода не превышает 1–2 нм, что соответствует погрешности расшифровки менее $\lambda/300$.

Заключение. Таким образом, результаты экспериментальной проверки модифицированного метода показывают, что предлагаемый в данной работе алгоритм коррекции фазовой неоднозначности позволяет устранить грубые ошибки, связанные с искажением профиля интерференционных полос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гужов В. И., Ильиных С. П.** Компьютерная интерферометрия. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.
2. **Ильиных С. П., Гужов В. И., Кафидова Н. Е., Бочаров Д. Д.** Робастный алгоритм расшифровки интерферограмм // Автометрия. 2005. **41**, № 3. С. 122.
3. **Виноградов И. М.** Основы теории чисел. М.: Наука, 1972.
4. **Каток А. Б., Хассельблат Б.** Введение в современную теорию динамических систем. М.: Факториал, 1999.
5. **Ванштейн Л. А., Зубаков Б. Д.** Выделение сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1957.
6. **Заездный А. М.** Основы расчетов по статистической радиотехнике. М.: Связь, 1969.

Поступила в редакцию 4 апреля 2007 г.
