

**UDK 621.317.5**

**МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК ПРИ ФАЗОВОМ  
РЕГУЛИРОВАНИИ**

**METHODS OF ERROR CORRECTION IN PHASE CONTROL**

Мамадалиев Махаммаджон Ахмадалиевич ассистент  
Андижанского машиностроительного института,  
Республика Узбекистан, г.Андижан  
Orcid id: ORCID ID: 0009-0004-2189-0994

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

**Ключевые слова:** элемент, объект, фаза, коэффициент, интерферометрии, связь, диапазон, комплекс, постоянной, потери, коррекции.

**Annotation:** A modification of the integer interferometry method is proposed, which is used to eliminate distortions of the interference fringe profile caused by errors in recording and processing interferograms.

**Keywords:** element, object, phase, coefficient, interferometry, communication, range, complex, constant, loss, correction.

**Введения:** В статье представлена информация о многих алгоритмах, реализующих подход фазовой неопределенности, который основан на оценке локальных разрывов фазы и суммировании поправочных коэффициентов, пропорциональных числу разрывов в области интегрирования пространственного пути интегрирования, с учетом отсутствия разрывов или их знака.

**Проблемы.**

**1. Ошибки, возникающие при фазовом контроле**

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

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

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

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

Здесь  $N(x,y)$ -число целых периодов  $2\pi$ , укладывающихся в полную оптическую разность фаз  $\Phi(x,y)$  и зависящих от геометрии схемы интерферометра и длины волны излучения лазера  $\lambda$ ;  $\phi(x,y)$ -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. Существует большое количество алгоритмов, реализующих данный подход. Как правило. Эти алгоритмы основаны на оценке разрывов локальных фаз и выборе пути пространственного интегрирования таким образом, чтобы область интегрирования не содержала разрывы, либо суммировании поправочных коэффициентов, пропорциональных количеству разрывов, с учетом их знака. 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  $2\pi$ , что является принципиальным ограничением одночастотных интерференционных систем. В работе предложен способ целочисленной интерферометрии, позволяющий реконструировать полную фазу  $\Phi$  непосредственно по значениям локальных фаз  $\Phi$ , используя

несколько длин волн лазера. Такой подход способствует устраниению отмеченных недостатков, но весьма чувствителен к ошибкам измерения локальных фаз  $\phi$ .

Вместо разности фаз интерферирующих волн  $\Phi$  удобно ввести в рассмотрение пропорциональную ей величину  $\Lambda$  - оптическую разность хода (OPD - Optical Path Difference) (далее - разность хода). Полная разность хода  $\Lambda$  связана с полной фазой  $\Phi$ :

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

где  $\delta$  - локальная разность хода, соответствующая локальной фазе  $\phi$  (эта величина изменяется от нуля до цены интерференционной полосы в длинах волн).

Измеренные значения локальных фаз  $\phi$  переводятся в локальные разности хода  $\delta$ , которые выражаются в виде целых значений с числом знаков, обеспечивающих необходимую точность измерения.

Для определения OPD требуется найти решение целочисленной системы сравнений

$$\begin{cases} \Lambda \equiv \delta_1 \bmod m_1, \\ \Lambda \equiv \delta_2 \bmod m_2. \end{cases}$$

Решение этой системы можно представить в виде траектории на комплексной плоскости  $(\delta_1, \delta_2)$ . Максимальная длина траектории  $L_{\max} = m_1 \times m_2 - 1$  задает динамический диапазон однозначного определения  $\Lambda$ . 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 Не-Ne- и Аг-лазеров) и  $L_{\max} = 10/m_2$ , то  $\delta L = 52$ .

При неточном определении исходных значений  $\delta_{1,2}^i = \delta_{1,2} + \varepsilon_{1,2} \delta_{1,2}$  решение системы сравнений приводит к грубым ошибкам, так как разность хода  $\Lambda^i$  соответствующая  $\delta_1^i$  и  $\delta_2^i$  на комплексной плоскости будет больше  $\Lambda_{\max}$ . Если

точка на комплексной плоскости, соответствующая  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , отклоняется от ближайшей диагонали траектории на величину не более  $\delta L/2$ , данную ошибку можно компенсировать.

Наибольший вклад в искомую погрешность дает отклонение профиля интерференционных полос от вида выражения. Чаще всего отклонение этой зависимости от к синусоидальной формы вызывается спекло образной структурой изображения при когерентном освещении.

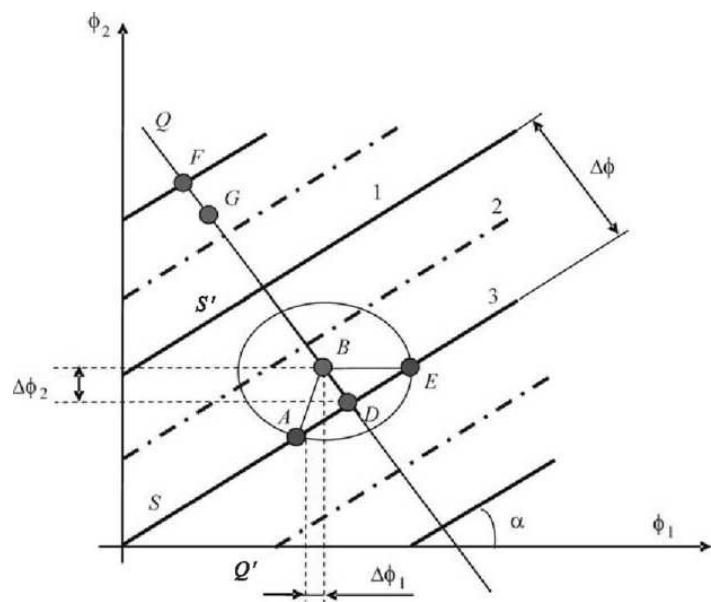


Рис. 1. Траектория интерференционного сигнала на комплексной плоскости

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

**2. 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

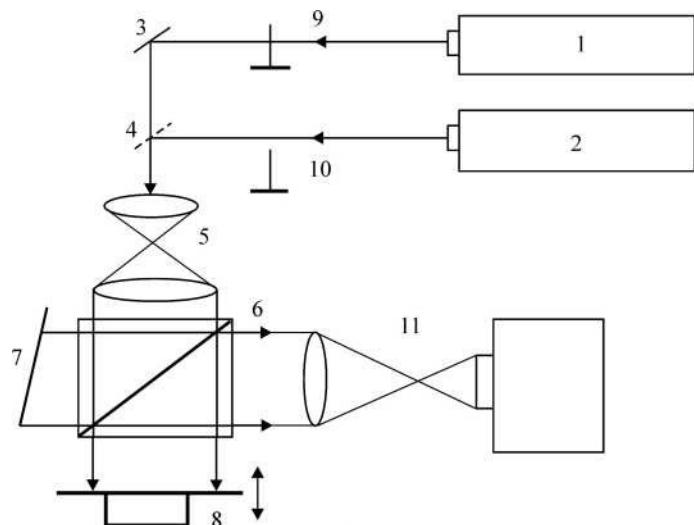
$$\Delta = \text{const}$$

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 А является кусочно-постоянной функцией независимо от закона изменения ОРД. Без потери устойчивости на этапе коррекции допустимо отклонение оценки разности на величину, не превышающую половины расстояния между диагоналями 1 и 3 линии сигналов 2 (рис. 1).

4. Сформировать фазовые плоскости  $(\Delta_1, \delta_2)$ ,  $(\Gamma_1, \delta_2)$  и  $(\delta_1, \Gamma_2)$  по следующему правилу:

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

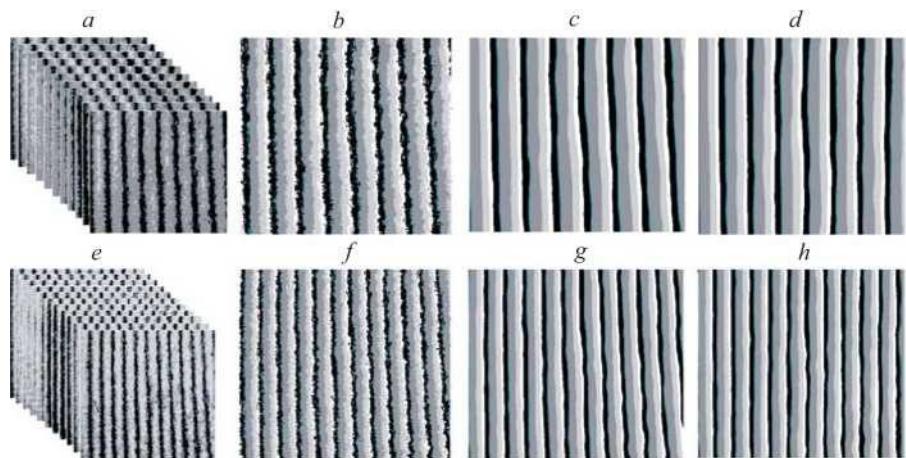


**Рис. 2.** Оптическая схема интерферометра: 1,2- лазеры; 3,7- зеркала; 4 – полупрозрачное зеркало; 5 - коллиматор; 6 - светоделительный кубик; 8 - подвижное опорное зеркало; ,10-прерыватели луча; 11 - устройство ввода

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

Экспериментальная проверка производилась путем измерения рельефа эталонного объекта основным и предлагаемым способами. 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 выполнялась следующим образом: сначала поочередно регистрировались интерферограммы с разными длинами волн, затем изменялось положение опорного зеркала.



**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*)

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 (рис. 3, *c*, *g*) и устранение волновых aberrаций оптической схемы интерферометра (рис. 3, *d*, *h*) соответственно.

На втором этапе вычислялись локальные фазы и  $\phi_2$  согласно методике, изложенной в. Фазовые профили интерферограмм  $\phi_1$  и  $\phi_2$  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 изо- фазные области ( $\Delta\phi = \text{const}$ ) и синтезированные фазы ( $\phi_1, \phi_2$ ) и ( $\phi_1, \phi_2$ ) и вычисление соотсивующих им полных фаз  $\Phi$ ,  $\Phi_1$ , и  $\Phi_2$  по модифицированному методу (рис. 5, *a-f*).

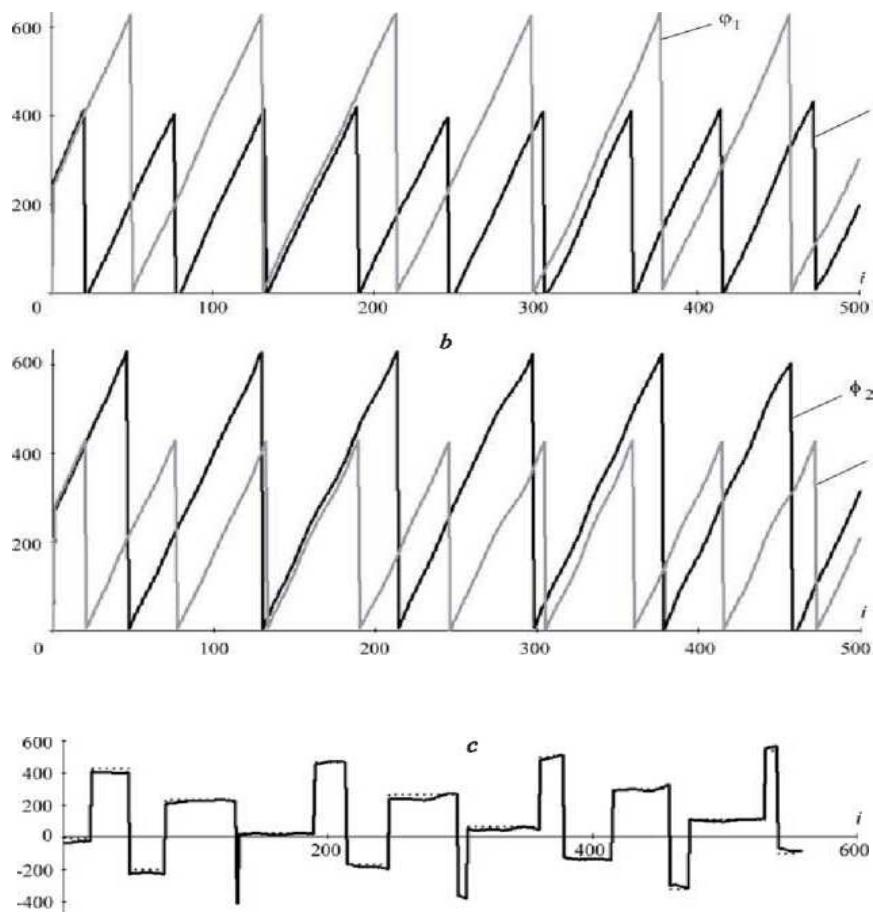
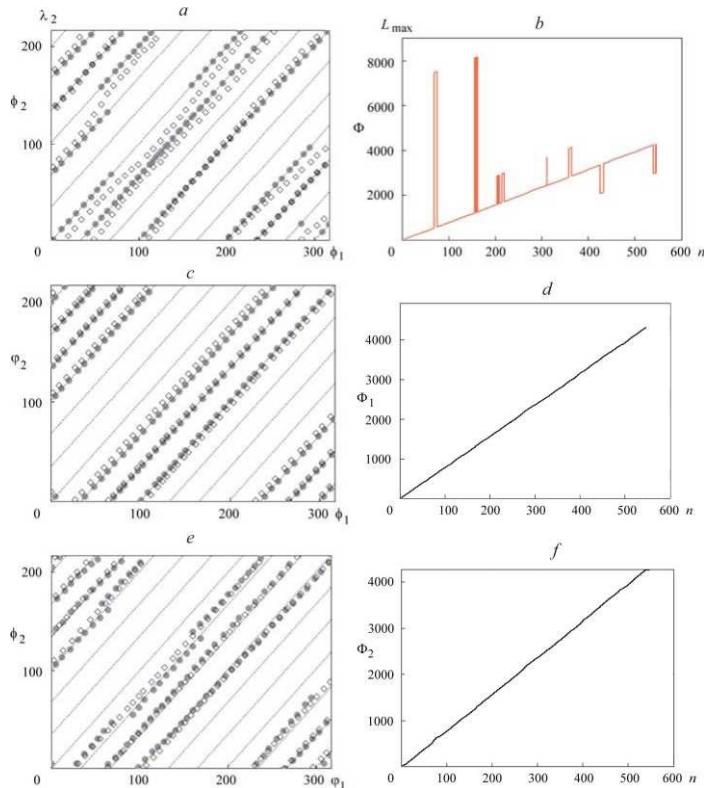


Рис. 4. Фазовые профили второго этапа: профили фаз  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  и соответствующие им синтезированные фазы  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  (*a*,*b*), разность фаз  $\Delta\phi$  (*c*)

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  $\lambda$  из-за наличия грубых ошибок, вызванных искажением профиля ин-

терференционных 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  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , не превышает 2-5 нм.



**Рис. 5.** Результаты вычислений третьего этапа: фазовые плоскости ( $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ) (a), ( $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ) (c), ( $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ) (e); полная фаза  $\Phi$  (b),  $\Phi_1$  (d),  $\Phi_2$  (f)

Среднеквадратическая погрешность измерения полной для модифицированного метода не превышает 1-2 нм, что соответствует погрешности расшифровки менее  $\lambda/300$ .

**Заключение.** Исправление ошибок, возникающих при управлении фазами, требует системного подхода, технологий, обучения и активного участия сотрудников. Эти методы позволяют повысить эффективность управления и постоянно совершенствовать процессы.

## Литературы

- 1.Imomov Sh. Engineering Design Calculation of a Biogas Unit Recuperator Applied Solar Energy, September 2007, Volume 43, Issue 3, pp. 196- 197.
- 2.Imomov Sh. Heat transfer process during phase back-and-forth motion with biomass pulse loading. Applied Solar Energy, June 2009, Volume 45, Issue 2, pp. 116-119.
- 3.Имомов НЕ, Каюмов Т., Усмонов К., Хакимов Б., Султонов М. Способ переработки органических отходов и установка для его осуществления. A01C3/00, C05F3/00. IAP 20160389.UZ. Оф.вес. №3.
- 4.Имомов Ш., Мамадалиева З. Султонов М., Усмонов К., Худойбердиев А. Каюмов Т. Мусурмонов Ш. Программа для контроля
- 5.Karimjonov, D. D., Siddiqov, I. X., Azamov, S. S., & Uzakov, R. (2023, March). Study on determination of an asynchronous motor's reactive power by the current-to-voltage converter. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1142, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
- 6.Zakirova Irodaxon Zakrullayevna, Mamadaliyev Muhammadjon Ahmadaliyevich.(2022.april) European International Journal of Multidisciplinary Research and Management Studies. MSS Ugli... - ... International Journal of Multidisciplinary Research and ..., 2022