

Алгоритмы расшифровки интерференционных картин методом пошагового фазового сдвига

В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Кузнецов Р.А., Хайдуков Д.С.
Новосибирский государственный технический университет (Россия)

Аннотация: В статье рассматривается алгоритм явного определения фазовых сдвигов из серии интерференционных картин, полученных методом пошагового фазового сдвига

Ключевые слова: Метод фазовых шагов, интерферограмма, уравнения расшифровки.

I. ВВЕДЕНИЕ

Наибольшее применение при построении интерференционных систем в последние годы получили методы получения и расшифровки интерферограмм на основе пошагового сдвига (пошаговая или фазо-сдвигающая интерферометрия, *phase-sampling, phase-shifting interferometry*) [1-12]. Метод пошагового фазового сдвига основан на регистрации нескольких интерференционных картин при изменении фазы опорной волны δ_i на некоторые известные значения.

$$I_i(x, y) = I_0 \{1 + V(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_i]\}, \quad (1)$$

где $i=0, 2, \dots, m-1$, m - число фазовых сдвигов.

Основное выражение для измерения фазовых разностей можно представить в виде:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{i=0}^{m-1} k_i I_i(x, y) \sin \delta_i}{\sum_{i=0}^{m-1} p_i I_i(x, y) \cos \delta_i}, \quad (2)$$

где k_i и p_i - коэффициенты, определяемые из решения системы трансцендентных уравнений (1).

II. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Погрешность при измерении фазы зависит от погрешности при установке фазового сдвига и погрешности при измерении интенсивности [13,14]. Дифференцируя по δ_i и I_i получим:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \delta_k} = \frac{I_k k_k \cos \delta_k \sum_{i=0}^{m-1} p_i I_i \cos \delta_i + \dots}{\left(\sum_{i=0}^{m-1} k_i I_i(x, y) \sin \delta_i\right)^2 + \dots}$$

$$\dots \frac{+ I_k p_k \sin \delta_k \sum_{i=0}^{m-1} k_i I_i(x, y) \sin \delta_i}{\left(\sum_{i=0}^{m-1} p_i I_i(x, y) \cos \delta_i\right)^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial I_k} = \frac{k_k \sin \delta_k \sum_{i=0}^{m-1} p_i I_i(x, y) \cos \delta_i - \dots}{\left(\sum_{i=0}^{m-1} k_i I_i(x, y) \sin \delta_i\right)^2 + \dots} - \frac{p_k \cos \delta_k \sum_{i=0}^{m-1} k_i I_i \sin \delta_i}{\left(\sum_{i=0}^{m-1} p_i I_i(x, y) \cos \delta_i\right)^2},$$

где $k = 0, 2, \dots, m-1$.

При условии $\Delta \varphi \ll \varphi_k$ и $\Delta I \ll I_k$ получим выражения для оценок абсолютной и относительной погрешностей.

$$\Delta \varphi \approx \sum_{i=0}^{m-1} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_i} \right| (\pm \Delta \varphi_i) + \sum_{i=0}^{m-1} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial I_i} \right| (\pm \Delta I_i), \quad (4)$$

$$\Delta \varphi \approx \sum_{i=0}^{m-1} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_i} \right| \varphi_i (\pm \partial \varphi_i) + \sum_{i=0}^{m-1} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial I_i} \right| I_i (\pm \partial I_i), \quad (5)$$

где $\partial \varphi_i = \frac{\Delta \varphi_i}{\varphi_i}$, а $\partial I_i = \frac{\Delta I_i}{I_i}$

$$\partial \varphi = \frac{\Delta \varphi}{\varphi} \approx \sum_{i=0}^{m-1} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_i} \frac{\varphi_i}{\varphi} \right| (\pm \partial \varphi_i) +$$

$$+ \sum_{i=0}^{m-1} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial I_i} \frac{I_i}{\varphi} \right| (\pm \partial I_i) \quad (6)$$

В выражении для определения абсолютной погрешности (4) коэффициенты $\frac{\Delta \varphi_i}{\varphi_i}$, и

$\frac{\Delta I_i}{I_i}$ имеют различный порядок. Из

выражений (2) и (3) видно, что эти коэффициенты отличаются множителем I_k . Для оценки влияния погрешностей, вносимых

неправильным определением интенсивности и погрешностей при установке фазового сдвига, перепишем (4) в виде:

$$\Delta\phi \approx \sum_{i=0}^{m-1} \left| \frac{\partial\phi}{\partial\delta_i} \right| (\pm\Delta\varphi_i) + \sum_{i=0}^{m-1} \left| \frac{\partial\phi}{\partial I_i} \right| I_i (\pm\Delta I_i), \quad (7)$$

Таким образом, оценка абсолютной погрешности фазы зависит от относительной ошибки при измерении интенсивности $\frac{\Delta I_i}{I_i}$ и

случайной флуктуации установки фазового сдвига $\Delta\varphi_i$. Точность измерения фазы зависит от абсолютной погрешности при установке фазового сдвига. Такие ошибки могут быть вызваны, например, гистерезисом, вибрациями при движении пьезокерамики или вибрациями установки при проведении эксперимента. Такие погрешности очень сложно корректировать. Для уменьшения погрешностей приходится использовать дорогостоящие системы для точной калибровки устройств сдвига.

III. ОПИСАНИЕ МЕТОДА И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Целью данной работы является определение

действительной величины вносимых фазовых сдвигов путем анализа траектории интерференционных сигналов в двух произвольных точках (А и В) на интерферограмме. В этом случае не требуется априорного знания величины сдвига.

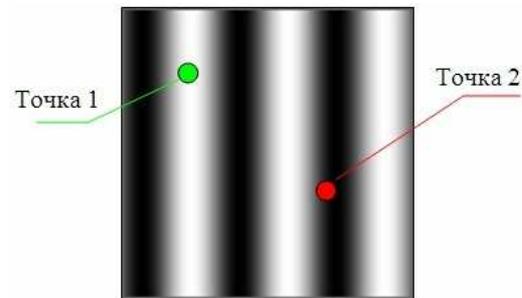


Рис. 1 Две произвольные точки на интерферограмме, по которым определяется фазовый сдвиг

На Рис. 2 показаны профили интерференционных полос, получаемые при внесении фазовых сдвигов для двух точек интерферограмм А и В, соответственно.

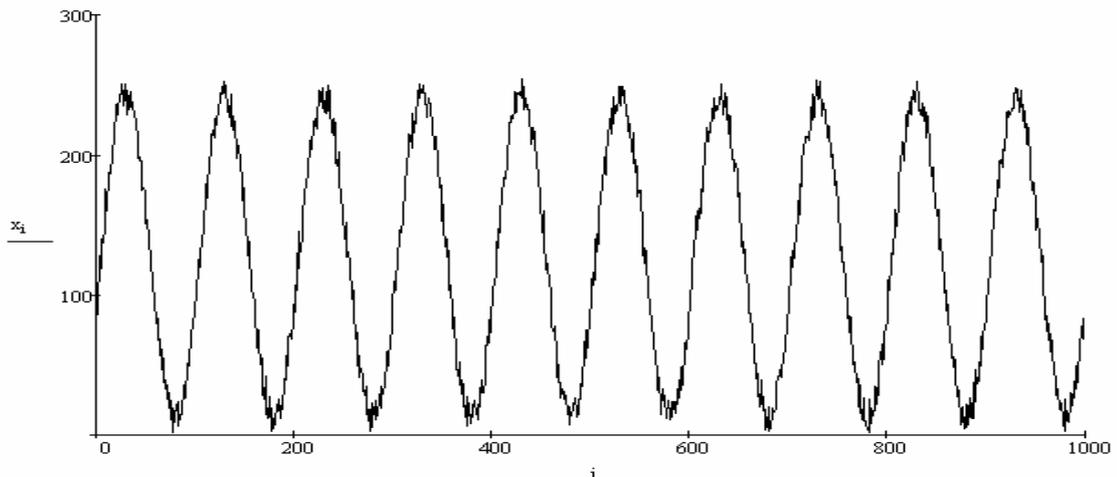


Рис. 2(А). Профиль интерференционных полос в точке 1

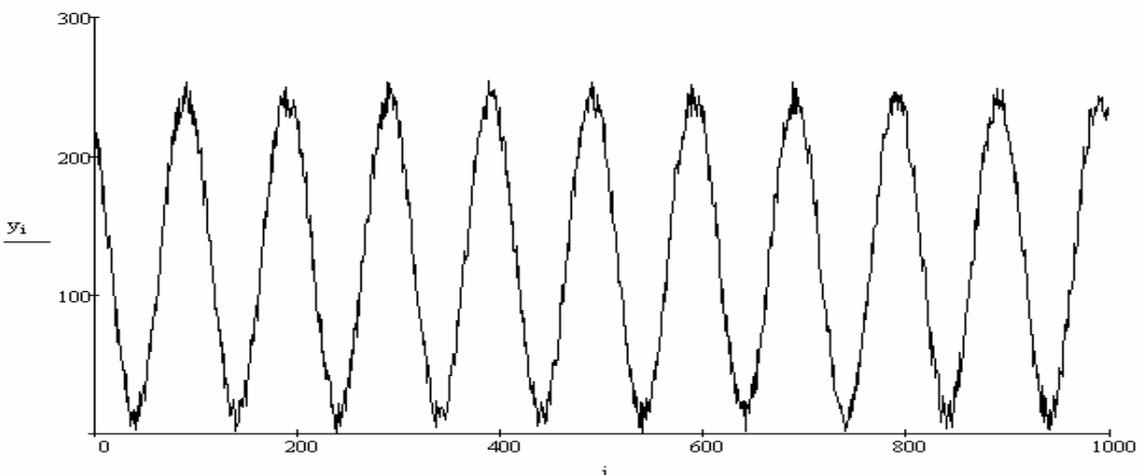


Рис. 2(В). Профиль интерференционных полос в точке 2

Будем искать решение в комплексной плоскости с осями I_1, I_2 , на которых откладываются значения интенсивностей первой и второй точек, соответствующих различным фазовым сдвигам.

$$I_{i,1} = I_{0,1} [1 + V_1 \cos(\phi_k + \delta_i)]$$

$$I_{i,2} = I_{0,2} [1 + V_2 \cos(\phi_k + \delta_i)], \quad (8)$$

где $i=0,2, \dots, m-1, m \gg 5$.

При изменении углов сдвига от 0 до 2π точка на комплексной плоскости описывает некоторую траекторию. Несложно показать, что данная траектория представляет собой центральную кривую второго порядка (произвольно ориентированный эллипс) с центром в точке $(I_{0,1}, I_{0,2})$.

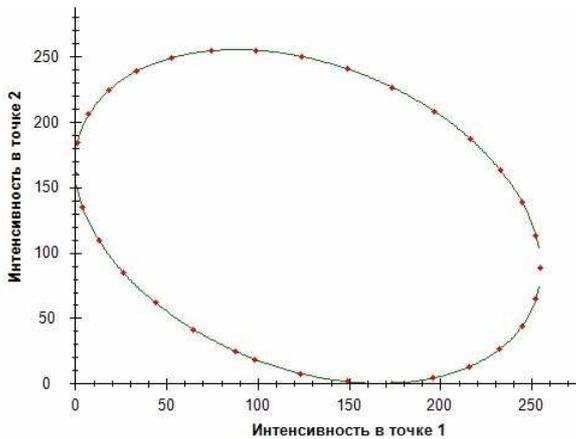


Рис.3 Идеальная траектория, которую пробегает значения интенсивностей в двух точках

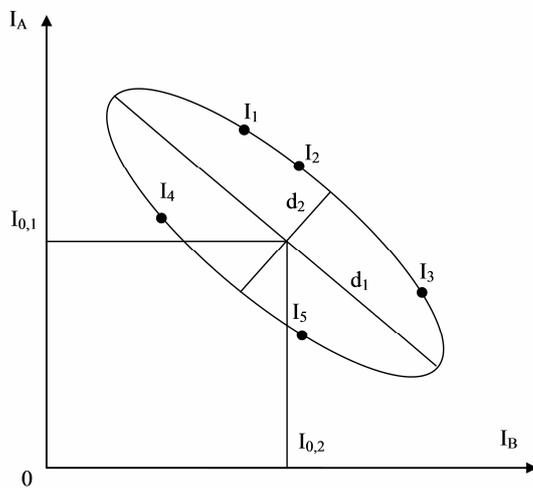


Рис.4 Определение параметров эллипса по 5 точкам. (d_1 и d_2 - главные оси эллипса, $I_{0,1}, I_{0,2}$ - координаты центра).

Для определения характеристик траектории

необходимо определить коэффициенты уравнения аппроксимирующей кривой

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0, \quad (9)$$

где x и y - значения интенсивности в выбранных точках. Для определения параметров эллипса достаточно 5 точек (Рис. 4).

Коэффициенты a_{ij} уравнения (9) можно получить путем вычисления определителя минора при соответствующем коэффициенте [15] (стр.64-76).

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{22} & a_{13} & a_{23} & a_{33} \\ I_{11}^2 & I_{11}I_{21} & I_{21}^2 & I_{11} & I_{21} & I \\ I_{12}^2 & I_{12}I_{22} & I_{22}^2 & I_{12} & I_{22} & I \\ I_{13}^2 & I_{13}I_{23} & I_{23}^2 & I_{13} & I_{23} & I \\ I_{14}^2 & I_{14}I_{24} & I_{24}^2 & I_{14} & I_{24} & I \\ I_{15}^2 & I_{15}I_{25} & I_{25}^2 & I_{15} & I_{25} & I \end{bmatrix} \quad (10)$$

Однако из-за погрешностей измерения интенсивностей, траектории реальных интерференционных сигналов в пространстве интенсивностей имеют следующий вид.

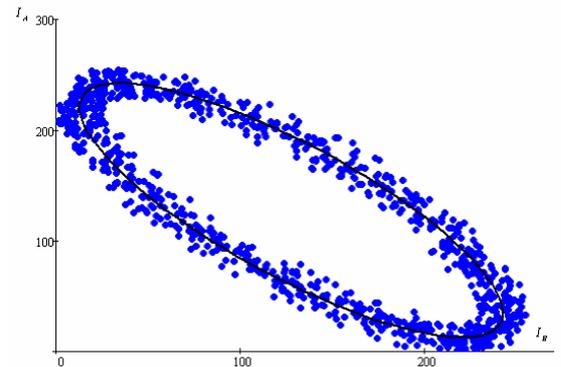


Рис. 4 Траектория в комплексной плоскости реальных интерференционных сигналов

На рис. 4 показаны траектории интерференционных сигналов в пространстве интенсивностей, точками отображена траектория, полученная при внесении фазовых сдвигов, а сплошной линией - результат ее аппроксимации полиномом второго порядка.

Учитывая избыточность исходных данных, можно использовать для этой цели метод наименьших квадратов.

$$\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{22} \\ a_{13} \\ a_{14} \\ a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \sum_i x_i & \sum_i y_i & \sum_i x_i y_i & \sum_i x_i^2 & \sum_i y_i^2 \\ \sum_i x_i & \sum_i x_i^2 & \sum_i x_i y_i & \sum_i x_i^2 y_i & \sum_i x_i^3 & \sum_i x_i y_i^2 \\ \sum_i y_i & \sum_i x_i y_i & \sum_i y_i^2 & \sum_i x_i y_i^2 & \sum_i x_i^2 y_i & \sum_i y_i^3 \\ \sum_i x_i y_i & \sum_i x_i^2 y_i & \sum_i x_i y_i^2 & \sum_i x_i^2 y_i^2 & \sum_i x_i^3 y_i & \sum_i x_i y_i^3 \\ \sum_i x_i^2 & \sum_i x_i^3 & \sum_i x_i^2 y_i & \sum_i x_i^3 y_i & \sum_i x_i^4 & \sum_i x_i^2 y_i^2 \\ \sum_i y_i^2 & \sum_i x_i y_i^2 & \sum_i y_i^3 & \sum_i x_i y_i^3 & \sum_i x_i^2 y_i^2 & \sum_i y_i^4 \end{bmatrix}^{-1} e, \quad (12)$$

где e - единичный вектор с размерностью равной количеству коэффициентов уравнения (8).

Однако в результате применения данного алгоритма возникают существенные вычислительные погрешности. Поэтому мы советуем применять следующий алгоритм для нахождения коэффициентов уравнения (9).

В качестве критерия приближения здесь выступает минимизация суммы квадратов отклонений (как и в традиционном МНК), но алгоритм также учитывает определенные ограничения для коэффициентов эллипса.

1) Формируем матрицу D , состоящую из следующих элементов:

$$D = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & x_1 y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^2 & y_i^2 & x_i y_i & x_i & y_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & x_n y_n & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где x_i и y_i — координаты i -ой точки на плоскости, т.е. значения интенсивностей в точке 1 и точке 2, $i=1 \dots n$, n - общее количество точек.

2) Вычисляем матрицу S

$$S = D^T D. \quad (14)$$

3) Решается обобщенная задача на собственные значения

$$Sq = \lambda Cq, \quad (2-7)$$

где матрица C имеет следующий вид:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

На данном шаге необходимо найти собственные значения λ и соответствующие им собственные векторы q , удовлетворяющие условию (14).

4) Из найденных собственных значений необходимо выбрать минимальное.

Собственный вектор, соответствующий минимальному собственному значению и будет

определять коэффициенты уравнения эллипса. Пусть $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]^T$ — собственный вектор, соответствующий минимальному собственному значению. Тогда коэффициенты уравнения эллипса могут быть определены следующим образом:

$$\begin{aligned} a_{11} &= q_1 & a_{12} &= q_3/2 \\ a_{22} &= q_2 & a_{13} &= q_4/2 \\ a_{33} &= q_6 & a_{23} &= q_5/2 \end{aligned}$$

С реализацией первых двух пунктов алгоритма аппроксимации не возникает затруднений. Однако третий шаг алгоритма не является тривиальным. Рассмотрим данную проблему подробнее.

Вещественное число λ и вектор q называются собственной парой матрицы A , если они удовлетворяют следующему условию:

$$Aq = \lambda q. \quad (16)$$

В случае если вещественная матрица A размером $N \times N$ симметрична, у неё есть N собственных чисел (не обязательно различных) и N соответствующих им собственных векторов, образующих ортонормированный собственный базис.

Для решения уравнения (16) имеется много различных алгоритмов. Первым алгоритмом, решающим задачу собственных значений для симметричной матрицы размером $N \times N$, был алгоритм Якоби, приводящий матрицу к диагональной форме ортогональными преобразованиями. По мере осуществления преобразований исходной матрицы, элементы за пределами главной диагонали уменьшались, а на главной диагонали - увеличивались. Естественным результатом этого процесса является матрица, у которой внедиагональные элементы равны нулю, а на диагонали находятся собственные значения. Есть и другие алгоритмы, например, семейство алгоритмов, основанных на QL/QR-итерации, применяемой к трехдиагональной матрице. Наиболее подробно проблема собственных значений рассматривается в [16].

Обобщенная задача на собственные значения, в отличие от задачи (16), состоит в нахождении такого числа λ и вектора q , чтобы они удовлетворяли следующему условию:

$$Aq = \lambda Bq, \quad (17)$$

где B — матрица, относительно которой ищутся собственные значения матрицы A .

Для решения задачи (17) также имеются различные методы. Большая часть из этих методов требует, чтобы матрица, относительно которой ищется собственное значение, была положительно-определенной. В нашем случае мы ищем собственные значения матрицы S относительно матрицы C , а матрица C не является положительно-определенной. И еще, обычно используемые на практике алгоритмы поиска собственных значений носят итерационный характер. Поэтому при программной реализации данные алгоритмы будут давать приближенные собственные значения, что в нашем случае является нежелательным, так как это приведет к уменьшению точности рассматриваемого нами алгоритма расшифровки.

Поэтому задачу (14) будем решать следующим образом. Для нахождения собственных значений матрицы S относительно матрицы C необходимо найти корни следующего уравнения

$$|S - \lambda C| = 0. \quad (18)$$

Раскрываем определитель левой части уравнения (18), содержащий 720 членов (матрица размерности 6×6 , количество элементов $6! = 720$). В результате получаем уравнение третьей степени следующего вида

$$x^3 + ax^2 + bx + c = 0. \quad (19)$$

Для нахождения корней полученного уравнения можно использовать формулы Виетта-Кардано. Для этого вначале вычисляются

$$Q = (a^2 - 3b) / 9$$

$$R = (2a^3 - 9ab + 27c) / 54$$

Далее, если $R^2 < Q^3$, то уравнение имеет три действительных корня, которые вычисляются по формулам

$$t = \arccos \frac{R}{3\sqrt{Q^3}}$$

$$x_1 = 2\sqrt{Q} \cdot \cos(t) - a/3 \quad (20)$$

$$x_2 = 2\sqrt{Q} \cdot \cos\left(t + \frac{2\pi}{3}\right) - a/3 \quad (21)$$

$$x_3 = 2\sqrt{Q} \cdot \cos\left(t - \frac{2\pi}{3}\right) - a/3 \quad (22)$$

В том случае, когда $R^2 \geq Q^3$, то действительных корней один (общий случай) или два (вырожденные случаи). Кроме действительного корня, имеется два комплексно-сопряженных. Для их нахождения вычисляются

$$A = \text{sign}(R) \sqrt[3]{|R| + \sqrt{R^2 - Q^3}}$$

$$B = Q/A \text{ при } A \neq 0 \text{ или } B = 0 \text{ при } A = 0$$

Действительный корень:

$$x_1 = (A + B) - a/3 \quad (23)$$

Комплексно-сопряженные корни:

$$x_{2,3} = -\frac{A+B}{2} - a/3 \pm i\sqrt{3} \frac{A-B}{2} \quad (24)$$

В том случае, когда $A=B$, то комплексно-сопряженные корни вырождаются в действительный:

$$x_2 = -A - a/3 \quad (25)$$

В нашем случае уравнение (17) будет иметь три действительных корня. Поэтому для нахождения корней достаточно воспользоваться формулами (20) - (25).

При программной реализации алгоритма нахождения корней уравнения (17) возникли проблемы следующего характера. При вычислении коэффициентов a, b и свободного члена c кубического уравнения (17) возникла необходимость в более точных методах вычислений. Стандартные, встроенные в языки программирования типы данных с двойной точностью не справлялись: возникало переполнение в силу одновременного оперирования слишком большими и слишком малыми величинами. Для разрешения этой проблемы был реализован калькулятор неограниченной точности на основе рациональных чисел, при помощи которого были вычислены необходимые коэффициенты кубического уравнения.

На Рис. 5 представлен результат аппроксимации траектории интерференционных сигналов по предложенному выше алгоритму.

После определения коэффициентов уравнения эллипса необходимо рассчитать координаты его центра по следующим формулам:

$$x_0 = I_{01} = -\frac{\begin{vmatrix} a_{13} & a_{12} \\ a_{14} & a_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix}},$$

$$y_0 = I_{02} = -\frac{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{12} & a_{14} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix}} \quad (26)$$

Углы фазового сдвига можно определить непосредственно, если преобразовать траекторию к виду круговой траектории.

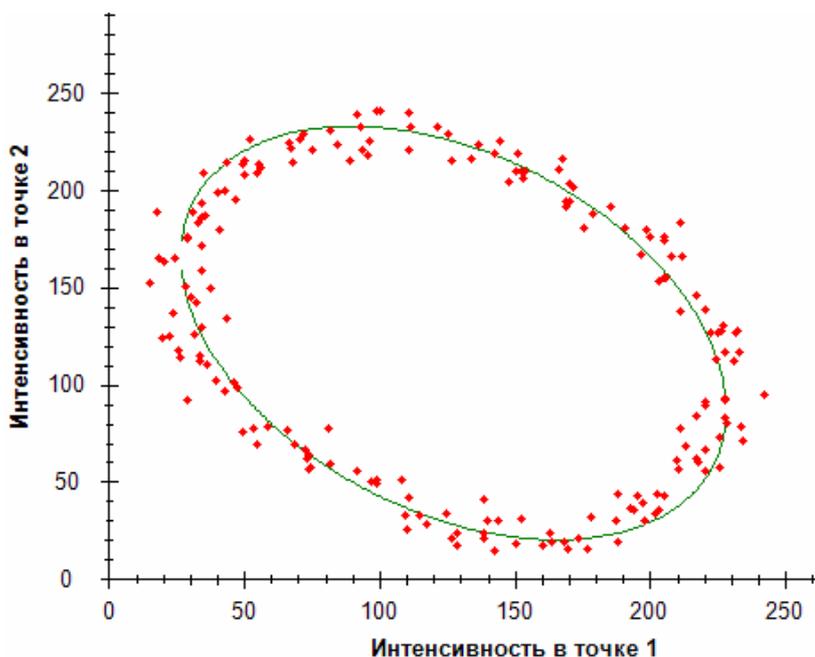


Рис. 5. Сплошная линия - результат аппроксимации кривой второго порядка

Для этого необходимо выполнить следующие преобразования над векторами исходных данных:

а) привести центр эллипса к началу координат
 $x1 = x - x0, \quad y1 = y - y0; \quad (27)$

б) развернуть эллипс параллельно одной из координатных осей.

$$\begin{bmatrix} x2 \\ y2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ y1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Угол поворота определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \Omega = \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}} \quad (29).$$

в) растяжение эллипса до круга. Коэффициент растяжения γ определяется из канонического уравнения эллипса, выраженного через его инварианты

$$\lambda_0 x^2 + \lambda_1 y^2 + \frac{I_3}{I_2} = 0, \quad (30)$$

где λ_0 и λ_1 - корни характеристического уравнения

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

из уравнения (2-5) видно, что отношение корней характеристического уравнения равно отношению диаметров эллипса

$$\gamma = \sqrt{\frac{\lambda_0}{\lambda_1}}, \quad (31)$$

Растяжение эллипса по координате y выполняется следующим образом $y2 = \frac{y2}{\gamma}$.

На рис. 6 показаны исходная и скорректированная траектории интерференционных сигналов.

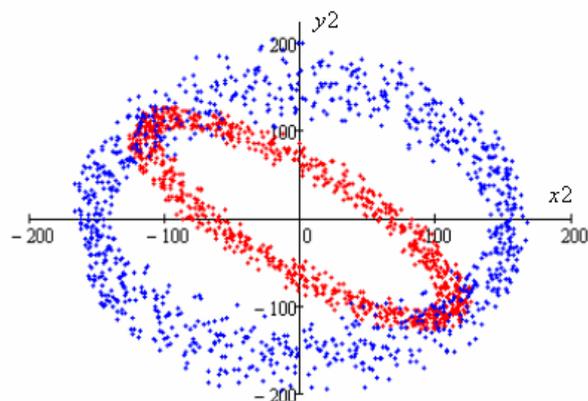


Рис. 6 Исходная и скорректированная траектории интерференционных сигналов

Фазовые сдвиги определяются по координатам (круговой) траектории

$$\delta_i = \operatorname{arctg} \frac{y2_i}{x2_i}. \quad (32)$$

На следующих рисунках приведены результаты расчетов по модельным интерференционным картинкам. Число фазовых сдвигов $m = 32$.

На Рис. 7 показана интерференционная картина с 256 уровнями интенсивности с двумя выбранными точками и траектория, построенная по 32 фазовым сдвигам. Фазовые сдвиги произвольные.

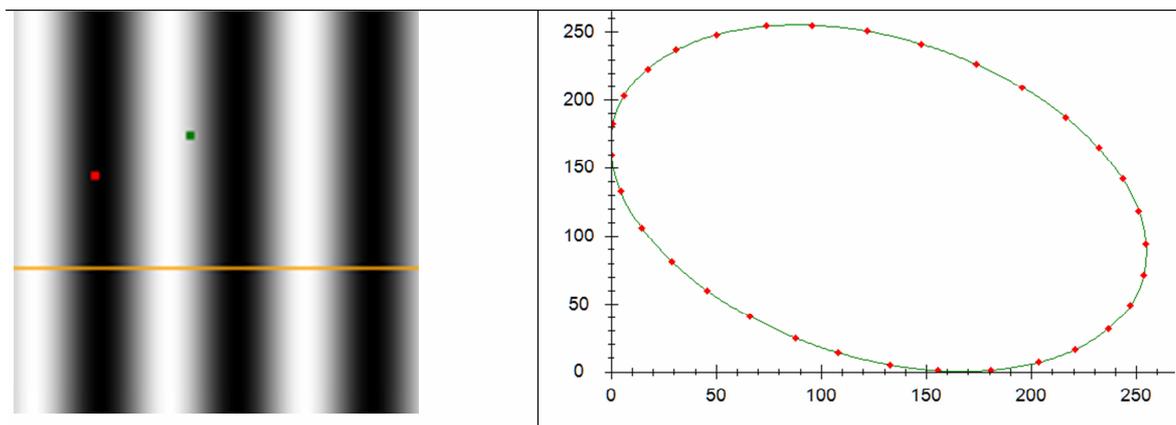


Рис. 7. Интерференционная картина с двумя wybranными точками и траектория, построенная по 32 фазовым сдвигам

На Рис. 8 графики заданных и полученных фазовых сдвигов. Среднеквадратичное отклонение составило 0,00412 рад. Это вызвано дискретностью задания интенсивности.

Дискретность задания интенсивности определяет погрешность, с которой может быть определены фазовые углы сдвига.

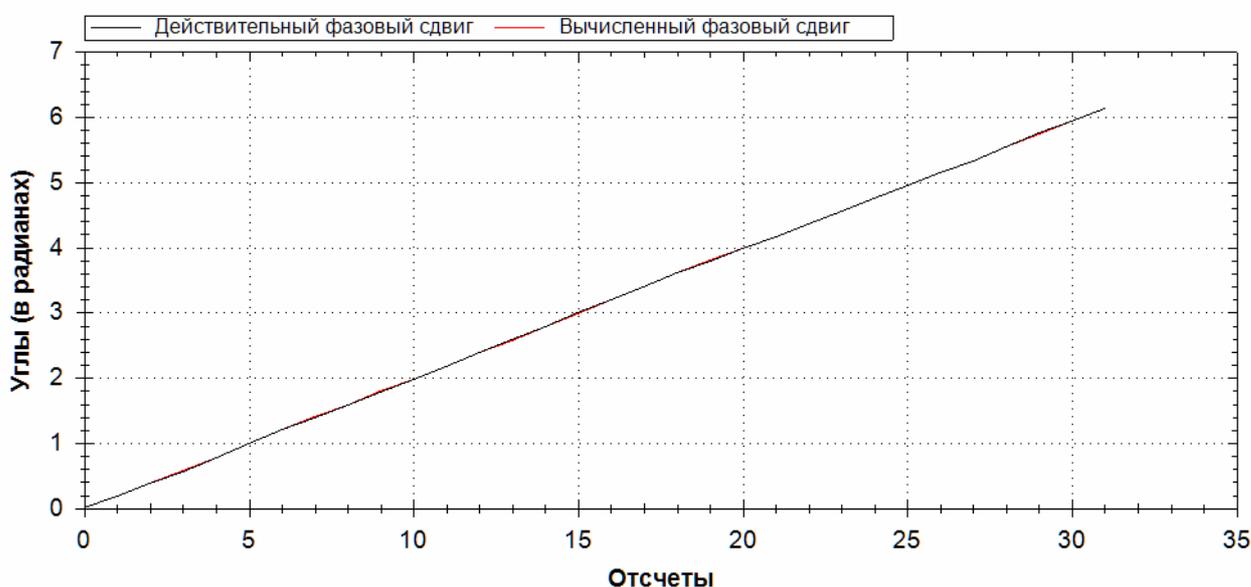


Рис. 8. Графики заданных и рассчитанных фазовых сдвигов (32 сдвига)

IV. ВЫВОДЫ

Реализован эффективный метод расшифровки интерференционных картин, полученных методом пошагового фазового сдвига, который полностью устраняет погрешности установки сдвигов при отсутствии ошибок регистрации интенсивностей. При использовании метода пошагового фазового сдвига существует два основных вида ошибок, которые вызывают погрешность при определении разности фаз – погрешность задания фазового сдвига и погрешность при определении значений интенсивности. Причем наибольший вклад в погрешность задает погрешность определения сдвига. В данной работе сделана попытка устранить основную составляющую погрешности – ошибки установки фазовых сдвигов. Однако погрешности, связанные с

измерением интенсивности остаются, и сказываются на точности определения фазовых сдвигов.

Достигнута точность расшифровки не менее 1% при исходной 20% погрешности установки фазовых сдвигов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки по проекту «Исследование предельных точностей оптических методов измерения параметров движения и мехатронных методов управления движением и разработка новых робототехнических и электромеханических систем», Темплан, проект № 7.559.2011.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hariharan P., Oreb B.F., Brown N. Digital phase-measurement system for real-time holographic interferometry // Optics Communication.- Vol.41.- №6.-1982.- pp.393-398
- [2] Wyant J.C., Creath K. Recent advances in interferometric optical testing // Laser Focus.- 1985. - pp.118-132.
- [3] Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic system and principles // Laser Focus.- 1982.- pp.65-67.
- [4] Creath K. Phase-shifting speckle interferometry // Applied Optics. 1985. V.24. P.3053-3058.
- [5] J.E.Greivenkamp and J.H.Bruning, "Phase shifting interferometry," in Optical Shop Testing, Ed. by D.Malacara (Wiley, New York, 1992), Chapter 14, pp. 501-598.
- [6] P. de Groot. Phase-shift calibration errors in interferometers with spherical Fizeau cavities // Applied Optics.-1994.-V.34.-No.16.-pp.2856-2863.
- [7] P. de Groot. 101-frame algorithm for phase shifting interferometry. EUROPTO, 1997, Preprint 3098-33.
- [8] J. Millerd, N. Brock, J. Hayes, et al., "Modern Approaches in Phase Measuring Metrology," Proc. SPIE. 5856, 14-22 (2004).
- [9] P. Gao, B. Yao, N. Lindlein, et al., "Phase-Shift Extraction for Generalized Phase-Shifting Interferometry," Opt.Lett., 2009, 34 (22), 3553-3555.
- [10] Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С., Вагизов А.Р. / Универсальный алгоритм расшифровки. // Научный вестник НГТУ. - 2010. - №4(41) – С. 51-58.
- [11] Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С., Вагизов А.Р. / Устранение ошибок фазового сдвига в интерферометрии // Автометрия. - 2011. - Т. 47, №1.-С. 96-101.
- [12] V.I. Guzhov, S. P. Il'yinykh, D. S. Khaidukov and A. R. Vagizov Eliminating phase-shift errors in interferometry // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.-2011., Vol.47, Nu.1.- pp. 76-80
- [13] Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // Автометрия.-1992.-№6.-С.24-30.
- [14] Schmit J., Creath K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry. //Applied Optics.-1995.-V.34.-No.19.-pp.3610-3619.
- [15] Г. Корн, Т. Корн Справочник по математике.- М., 1973, 832 с.
- [16] Дж. Х. Уилкинсон. Алгебраическая проблема собственных значений.-М. Наука, Физматлит.-1970, 564 с.



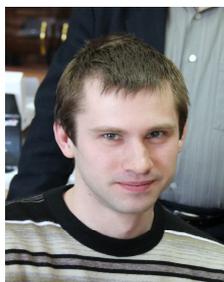
Гужов Владимир Иванович - декан факультета Автоматики и вычислительной техники Новосибирского Государственного Технического университета, профессор, доктор технических наук. Он является автором 120 научных работ, в том числе является обладателем 4 патентов.



Ильиных Сергей Петрович - доцент кафедры «Вычислительная техника» в НГТУ, доцент, кандидат технических наук, автор более 100 научных статей, в том числе, 4 патента и 1 учебник высшей школы. Область научных Интересов и компетенций – лазерные измерительные системы, обработка изображений. E-mail: isp51@yandex.ru



Сажин Игорь Александрович - доцент кафедры «Кафедра технической теплофизики» в НГТУ, доцент, кандидат технических наук.



Хайдуков Дмитрий Сергеевич - аспирант Новосибирского Государственного Технического университета.



Кузнецов Роман Александрович - аспирант Новосибирского Государственного Технического университета.

Область научных интересов: программные системы, высокоточные измерения. E-mail: vig@nstu.edu.ru