

затраты на них составили в мире \$ 28 млрд., а в 2013 г. ожидается \$ 34 млрд. К 2015 г. в мире в этой отрасли появится 4,4 млн. рабочих мест, из них 1,9 млн. в США.

### Литература

1. Капица С.П. Синергетика и прогнозы будущего // С.П. Капица, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 288 с.
2. Губарев В.В. Перспективные подходы в менеджменте / В.В. Губарев // Менеджмент в России и за рубежом, 2009, № 3. – С. 3–16.
3. Губарев В.В. Информатика: прошлое, настоящее, будущее / В.В. Губарев. – М.: Техносфера, 2011. – 432 с.
4. Карр Н.Д. Блеск и нищета информационных технологий: Почему ИТ не являются конкурентным преимуществом / Николас Дж. Карр. – М.: ИД «Секрет фирмы», 2005. – 176 с.
5. Открытые системы, 2012, № 9. –С. 8.

### АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Гужов В.И., Ильиных С.П., Кузнецов Р.С., Бердников П.А.  
Новосибирск, НГТУ

Рассматривается аналитическое решение интерференционной задачи расшифровки при неизвестных величинах фазовых сдвигах. Решение предназначено для анализа данных в интерференционных системах с пошаговым фазовым сдвигом.

#### **An analytical solution of the interference task. Guzhov V., Ilyikh S., Kuznetsov R., Berdnikov P.**

Is considered the analytical solution of the interference tasks decrypt in unknown values of the phase shifts. The solution is intended for the analysis of the data in the interference systems with step-by-step phase shift.

1. Введение. Наибольшее применение при построении интерференционных систем в последние годы получил метод фазовых сдвигов, в котором интерференционные картины получают изменяя фазу опорной волны на некоторые известные значения (пошаговая или фазо-сдвигающая интерферометрия, phase-sampling, phase-shifting interferometry) [1]. Основной трудностью при анализе интерферограмм в данном методе является определение точного значения вносимых фазовых сдвигов. В статье приводится аналитическое решение задачи расшифровки, не требующее априорного знания величины фазовых сдвигов.

2. Решение задачи расшифровки. Интенсивность в каждой точке интерферограммы можно представить уравнением

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

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

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

где  $N(x, y)$  - число целых периодов  $2\pi$  укладывающихся в полную оптическую разность фаз (полную фазу)  $\Phi(x, y)$  и зависящих от геометрии схемы

интерферометра, и от длины волны излучения лазера  $\lambda$ ,  $\phi(x, y)$  - локальная фаза соответствующая дробной части полной фазы  $\Phi(x, y)$ .  $\Delta\Phi$  вносимый фазовый сдвиг.

Если взять две точки на интерферограмме с координатами  $(x_A, y_A)$  и  $(x_B, y_B)$  при четырех фазовых сдвигах получим систему из десяти уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1(x_A, y_A) = A(x_A, y_A) + B(x_A, y_A) \cos(\phi(x_A, y_A)) \\ I_2(x_A, y_A) = A(x_A, y_A) + B(x_A, y_A) \cos(\phi(x_A, y_A) + \Delta\Phi_1) \\ I_3(x_A, y_A) = A(x_A, y_A) + B(x_A, y_A) \cos(\phi(x_A, y_A) + \Delta\Phi_2) \\ I_4(x_A, y_A) = A(x_A, y_A) + B(x_A, y_A) \cos(\phi(x_A, y_A) + \Delta\Phi_3) \\ I_5(x_A, y_A) = A(x_A, y_A) + B(x_A, y_A) \cos(\phi(x_A, y_A) + \Delta\Phi_4) \\ I_6(x_B, y_B) = A(x_B, y_B) + B(x_B, y_B) \cos(\phi(x_B, y_B)) \\ I_7(x_B, y_B) = A(x_B, y_B) + B(x_B, y_B) \cos(\phi(x_B, y_B) + \Delta\Phi_1) \\ I_8(x_B, y_B) = A(x_B, y_B) + B(x_B, y_B) \cos(\phi(x_B, y_B) + \Delta\Phi_2) \\ I_9(x_B, y_B) = A(x_B, y_B) + B(x_B, y_B) \cos(\phi(x_B, y_B) + \Delta\Phi_3) \\ I_{10}(x_B, y_B) = A(x_B, y_B) + B(x_B, y_B) \cos(\phi(x_B, y_B) + \Delta\Phi_4). \end{array} \right. \quad (3)$$

Далее для упрощения изложения индексы  $(x, y)$  опускаем.

Обозначим интенсивности  $I_1 - I_5$  как  $x_1 - x_5$ , интенсивности  $I_6 - I_{10}$  как  $y_1 - y_5$ , а уровни средней яркости  $A(x_A, y_A)$  и  $A(x_B, y_B)$  -  $x_0$  и  $y_0$  соответственно. С учетом принятых обозначений система уравнений (3) примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = x_0 + B_1 \cos(\phi_1) \\ x_2 = x_0 + B_1 \cos(\phi_1 + \Delta\Phi_1) \\ x_3 = x_0 + B_1 \cos(\phi_1 + \Delta\Phi_2) \\ x_4 = x_0 + B_1 \cos(\phi_1 + \Delta\Phi_3) \\ x_5 = x_0 + B_1 \cos(\phi_1 + \Delta\Phi_4) \\ y_1 = y_0 + B_2 \cos(\phi_2) \\ y_2 = y_0 + B_2 \cos(\phi_2 + \Delta\Phi_1) \\ y_3 = y_0 + B_2 \cos(\phi_2 + \Delta\Phi_2) \\ y_4 = y_0 + B_2 \cos(\phi_2 + \Delta\Phi_3) \\ y_5 = y_0 + B_2 \cos(\phi_2 + \Delta\Phi_4) \end{array} \right. \quad (4)$$

Если изменять фазовый сдвиг  $\Delta\Phi$  непрерывно, то точка на плоскости  $(x, y)$  опишет эллиптическую траекторию, то есть, любая точка, соответствующая системе уравнений (3) принадлежит некоторому эллипсу, удовлетворяющему следующему

уравнению

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0 \quad (5)$$

С учетом данного положения можно сократить число неизвестных в системе уравнений (4) приведя центр эллипса в начало координат.

Координаты центра эллипса  $x_0$  и  $y_0$  находим, решая систему уравнений

$$\begin{cases} a_{11}x_0 + a_{12}y_0 = a_{13} \\ a_{21}x_0 + a_{22}y_0 = a_{23} \end{cases}, \quad (6)$$

$$x_0 = -\frac{\begin{vmatrix} a_{13} & a_{12} \\ a_{23} & a_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}, \quad (7)$$

$$y_0 = -\frac{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{12} & a_{23} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}$$

После исключения переменных  $x_0$  и  $y_0$  система уравнений (4) примет вид

$$\begin{cases} x_1 = B_1 \cos(\phi_1) \\ x_2 = B_1 \cos(\phi_1 + \Delta\Phi_1) \\ x_3 = B_1 \cos(\phi_1 + \Delta\Phi_2) \\ x_4 = B_1 \cos(\phi_1 + \Delta\Phi_3) \\ x_5 = B_1 \cos(\phi_1 + \Delta\Phi_4) \\ y_1 = B_2 \cos(\phi_2) \\ y_2 = B_2 \cos(\phi_2 + \Delta\Phi_1) \\ y_3 = B_2 \cos(\phi_2 + \Delta\Phi_2) \\ y_4 = B_2 \cos(\phi_2 + \Delta\Phi_3) \\ y_5 = B_2 \cos(\phi_2 + \Delta\Phi_4) \end{cases}. \quad (8)$$

Выразим синус фазового угла в первой точке через значения интенсивностей с различными фазовыми сдвигами

$$B_1 \sin(\phi_1) = \frac{x_2 - x_1 \cos(\Delta\Phi_1)}{\sin(\Delta\Phi_1)} \quad (9)$$

$$B_1 \sin(\phi_1) = \frac{x_3 - x_1 \cos(\Delta\Phi_2)}{\sin(\Delta\Phi_2)}$$

И, вычитая, их друг из друга получим

$$x_1 \sin(\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2) + x_2 \sin(\Delta\Phi_1) - x_3 \sin(\Delta\Phi_2) = 0,$$

В векторном виде уравнение (9) примет вид для первой точки

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin(\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2) \\ \sin(\Delta\Phi_2) \\ -\sin(\Delta\Phi_1) \end{pmatrix} = 0, \quad (10a)$$

аналогично, для второй точки получим

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin(\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2) \\ \sin(\Delta\Phi_2) \\ -\sin(\Delta\Phi_1) \end{pmatrix} = 0. \quad (10б)$$

Исключая из выражений (10) член  $\sin(\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2)$  имеем

$$\left( \frac{x_2}{x_1} - \frac{y_2}{y_1} \right) \sin(\Delta\Phi_2) - \left( \frac{x_3}{x_1} - \frac{y_3}{y_1} \right) \sin(\Delta\Phi_1) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\sin(\Delta\Phi_2)}{\sin(\Delta\Phi_1)} = \frac{x_1 y_3 - x_3 y_1}{x_1 y_2 - x_2 y_1}, \quad (12)$$

Для других фазовых сдвигов отношение синусов имеет вид

$$\frac{\sin(\Delta\Phi_i)}{\sin(\Delta\Phi_j)} = \frac{x_1 y_i - x_i y_1}{x_1 y_j - x_j y_1} = s_{ij}. \quad (13)$$

Из выражения (9) следует

$$\sin(\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2) B_1 \sin(\phi_1) + x_1 \cos(\Delta\Phi_2) - x_3 \cos(\Delta\Phi_1) = 0, \quad (14)$$

$$\sin(\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2) B_2 \sin(\phi_2) + y_1 \cos(\Delta\Phi_2) - y_3 \cos(\Delta\Phi_1) = 0. \quad (15)$$

объединяя выражения (14) и (15) получим

$$\sin(\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2) \frac{x_2 - x_1 \cos(\Delta\Phi_1)}{\sin(\Delta\Phi_1)} + x_1 \cos(\Delta\Phi_2) - x_3 \cos(\Delta\Phi_1) = 0. \quad (16)$$

Раскрывая выражение (16) получим

$$\cos(\Delta\Phi_1) s_{21} - \cos(\Delta\Phi_2) - s_{21} \frac{x_2}{x_1} + \frac{x_3}{x_1} = 0, \quad (17)$$

$$\cos(\Delta\Phi_1) s_{21} - \cos(\Delta\Phi_2) + b_1 = 0, \quad (18)$$

где  $b_1 = s_{21} \frac{x_2}{x_1} - \frac{x_3}{x_1}$ .

Выражение (18) можно переписать в виде

$$c_1 s_{21} - c_2 + b_1 = 0 \quad (19)$$

С другой стороны, возводя в квадрат отношение синусов углов фазовых сдвигов, и, выражая синус через косинус, получим

$$s_{21} = \frac{s_2}{s_1} = \frac{\pm \sqrt{1 - c_2^2}}{\pm \sqrt{1 - c_1^2}},$$

$$\frac{1-c_2^2}{1-c_1^2} - s_{21}^2 = 0 \quad \text{или} \quad c_1^2 s_{21}^2 - c_2^2 - s_{21}^2 + 1 = 0 \quad (20)$$

Из полученного выражения (20) и уравнения (19) получаем систему уравнений для нахождения косинусов углов сдвига

$$\begin{cases} s_{21}c_1 - c_2 + b_1 = 0 \\ s_{21}^2 c_1^2 - c_2^2 - s_{21}^2 + 1 = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Решаем систему уравнений (21), выражая косинус второго угла фазового сдвига из первого уравнения системы  $c_1 = \frac{c_2 + b_1}{s_{21}}$  и подставляя его во второе уравнение:

$$(c_2 + b_1)^2 - (c_2^2 + s_{21}^2) + 1 = 0. \quad (22)$$

Графически решение уравнения (22) может быть представлено как пересечение гиперболы  $s_{21}^2 c_1^2 - c_2^2 - s_{21}^2 + 1 = 0$  с прямой  $s_{21}c_1 - c_2 + b_1 = 0$  (рис. 1). Штриховой линией показана область допустимых решений  $|c_1| \leq 1$  и  $|c_2| \leq 1$ . Данному условию удовлетворяет единственное решение уравнения (22)

$$c_1 = \frac{c_2 + b_1}{s_{21}}, \quad c_2 = \frac{s_{21}^2 - b_1 - 1}{2b_1} \quad (23)$$

Аналогично можно найти косинусы остальных углов фазовых сдвигов. Синусы углов фазовых сдвигов находим следующим образом:

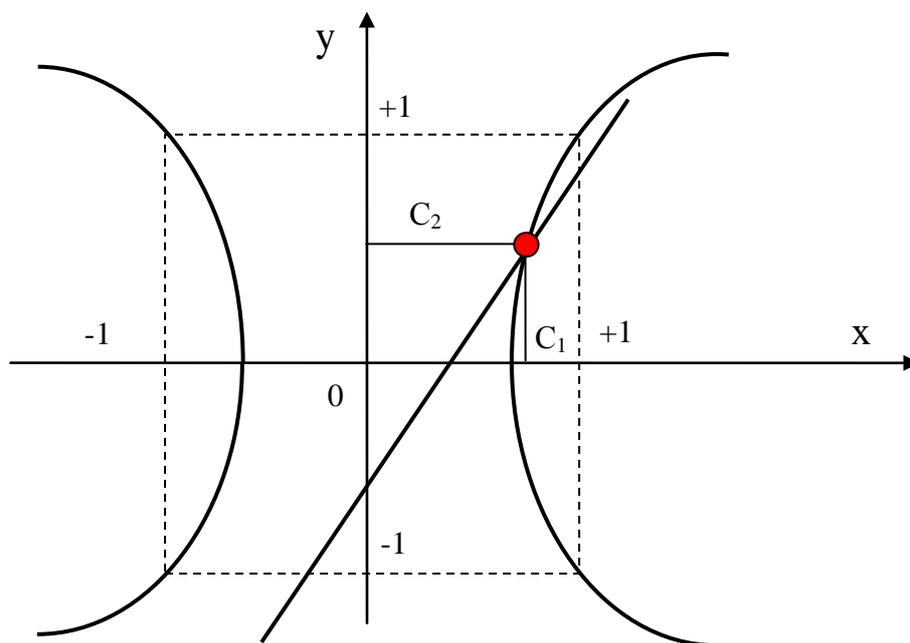


Рис 1. Решение системы уравнений (21)

- Выражаем синус первого угла фазового сдвига через значение его косинуса  $s_1 = \pm\sqrt{1-c_1^2}$ . Знак перед корнем выбирается равным знаку выражения  $x_1 y_2 - x_2 y_1$ .

- Остальные значения синусов углов фазовых сдвигов для согласования их знаков находим, подставляя найденное значение первого угла фазового сдвига в ранее найденные отношения синусов  $s_2 = s_{21}s_1$ ;  $s_3 = s_{31}s_1$   
 $s_4 = s_{41}s_1$  (24)

Для нахождения фазовых углов можно использовать одно из известных уравнений расшифровки, например:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \phi_1 &= \frac{(x_1 - x_2) + (x_1 - x_2)c_1 + (x_1 - x_2)c_2}{(x_1 - x_2)s_1 + (x_1 - x_2)s_2} \\ \operatorname{tg} \phi_2 &= \frac{(y_1 - y_2) + (y_1 - y_2)c_1 + (y_1 - y_2)c_2}{(y_1 - y_2)s_1 + (y_1 - y_2)s_2} \end{aligned} \quad (25)$$

3. Выводы. Получено аналитическое решение задачи расшифровки интерферограмм с пошаговым фазовым сдвигом, которое не требует априорного знания величины вносимых фазовых сдвигов.

### 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  
time holographic interferometry // Optics Communication.- Vol.41.- №6.-1982.- pp.393-398

## СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА НЕОДНОРОДНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ МЕТОДОМ ДЕРЕВЬЕВ НИТЕЙ

Гусев А.П.,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Аннотация. Представлена система распределения вычислительной нагрузки на неоднородной вычислительной сети. Для разработки системы решались две основные проблемы. Во-первых, разработка алгоритма анализа структуры сети и вычислительной мощности узлов. Во-вторых, разработка алгоритма для анализа и разделения программы на блоки вычислений в соответствии с используемыми ресурсами и необходимой вычислительной мощностью. Далее, рассматривается структура программы использующей параллельные вычисления. Приводится описание процесса функционирования всей системы. Описывается протокол сетевого взаимодействия.

### Processing load distribution system on a heterogeneous computer network by trees threads. Gusev A. Bauman Moscow State University

Abstract. The processing load distribution system on heterogeneous computer network is presented. Two basic problems are solved by developers. First, network structure and nodes processing power analyzing algorithm was development. Second, program analysis and separation algorithm, which separate program into blocks of calculations in accordance with used resources and necessary computing power, was developed. Then, authors take a look on program structure using parallel computing. The whole system process description is presented. Described network protocol.