Определение интенсивности опорного и объектного пучков при использовании метода пошагового фазового сдвига

В.И. Гужов, С.П. Ильиных
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

***Аннотация*: В статье рассмотрен новый способ определения интенсивности опорного и объектного пучков. Эта информация необходима для восстановления цифровых голограмм. Предлагаемый способ основан на анализеинтерференционных картин, получаемых с помощью изменения интенсивности объектного пучка и фазовых сдвигов.**

***Ключевые слова:* интерферометрия, пошаговый фазовый сдвиг, цифровая голография**

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая голография существенно расширяет возможности интерференционных методов. Методы цифровой голографии основаны на регистрации голограммы непосредственно на матрице фотоприёмников и дальнейшей их расшифровке с помощью компьютерных систем [1, 2]. Низкое разрешение современных матричных фотоприемников не позволяет устранить влияние центрального пучка на мнимое и действительное изображения при восстановлении их из классических голограмм. Использование методов пошагового фазового сдвига позволяет решить эту проблему [3, 4].

В отличие от восстановления классических голограмм, содержащих информацию только об интенсивности, при использовании цифровой голографии необходимо получить математическую (комплексную) голограмму, которая содержит амплитуду и фазу объектного поля [5, 6]:

$$G(x,y) = A_p(x,y)\exp\left(\varphi_p(x,y)\right). \qquad (1)$$

Значения фазы объектного пучка $\varphi_p(x,y)$ можно определить по разности фаз между опорным и объектным пучками $\phi(x,y) = \varphi_p(x,y) - \varphi_r(x,y)$ по нескольким цифровым голограммам с помощью методов пошагового фазового сдвига [7–10]. Если известно фазовое распределение опорного пучка, то можно определить и фазу объектной волны.

Поскольку в качестве опорного пучка обычно выбирается плоский пучок, то считается, что амплитудное $A_r(x,y)$ и фазовое распределения $\varphi_r(x,y)$ являются постоянными по всему полю голограммы. Однако распределение интенсивности объектного пучка $A_p(x,y)$ может существенно меняться. Влияние амплитудного распределения на качество восстановления изображений по математической голограмме (1) существенно. Поэтому его обязательно надо каким-либо образом измерить.

При экспериментальных измерениях можно зафиксировать амплитуду объектного пучка перекрыв опорный пучок с помощью заслонки. Однако в этом случае существенно изменится уровень освещенности и возникают ошибки, связанные с оцифровкой неполного диапазона поля интенсивности. В статье описывается новый способ определения амплитудных распределений опорного и объектного пучков по серии интерференционных картин, полученных методом пошагового фазового сдвига, при произвольном изменении интенсивности опорного пучка. В этом случае амплитуда объектного пучка восстанавливается более точно.

I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОПОРНОГО И ОБЪЕКТНОГО ПУЧКОВ

В общем виде уравнение двух интерферирующих волновых полей имеет вид

$$I_i(x,y) = A_p(x,y)^2 + A_r(x,y)^2 + \\ +2A_p(x,y)A_r(x,y)\cos\left(\phi(x,y) + \delta_i(x,y)\right), \qquad (2)$$

где $A_r(x,y)$ и $A_p(x,y)$ - интенсивности объектного и опорного интерферирующих волновых полей, а $\phi(x,y)$ разность их фаз и $\delta_i(x,y)$ - известные фазовые сдвиги.

При внесении серии известных фазовых сдвигов получаем систему транцендентных уравнений. Каждое из уравнений в общем случае имеет три неизвестных - $A_p(x,y)$, $A_r(x,y)$, $\phi(x,y)$.

Выражение (2) можно записать в виде

$$I_i(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos\left(\phi(x,y)+\delta_i\right), \tag{3}$$

где $A(x,y) = A_p^2(x,y) + A_r^2(x,y)$ и $B(x,y) = 2A_p(x,y)\cdot A_r(x,y)$. В дальнейшем обозначения (x,y) опускаем.

При изменении интенсивности опорного пучка A_r .для i-того фазового сдвига уравнение (2) можно представить как

$$I(n)_i = A_p{}^2 + \left(nA_r\right)^2 + 2nA_pA_r\cos\theta_i, \tag{4}$$

где n - коэффициент изменения интенсивности опорного пучка.

Параметр B зависит от n пропорционально, т.е.

$$B(n) = 2nA_pA_r = nB. \tag{5}$$

Зависимость параметра A от коэффициента n имеет более сложный (нелинейный) характер

$$A(n) = A_p{}^2 + \left(nA_r\right)^2 = A_p{}^2 + n^2A_r{}^2. \tag{6}$$

Решая систему из уравнений (5) и (6) получим

$$A_r = +\sqrt{\frac{A - A(n)}{1-n^2}} \tag{7а}$$

и

$$A_p = +\sqrt{\frac{A(n) - n^2A}{1-n^2}}. \tag{7б}$$

Представим систему уравнений (2) в векторном виде [2]:

$$\vec{I} = \vec{A} + (B\cos\phi)\vec{C} - (B\sin\phi)\vec{S} \tag{8}$$

где $\vec{S}$, $\vec{C}$, $\vec{I}$ при трех фазовых сдвигах равны:

$$\vec{S} = \left[\sin\delta_0,\quad \sin\delta_1,\quad \sin\delta_2\right]^T,$$

$$\vec{C} = \left[\cos\delta_0,\quad \cos\delta_1,\quad \cos\delta_2\right]^T,$$

и

$$\vec{A} = \left(A_p^2 + A_r^2\right)\left[1,\quad 1,\quad 1\right]^T,$$

$$\vec{I} = \left[I_0,\quad I_1,\quad I_2\right]^T.$$

Анализ выражения (8) показывает, что для нахождения постоянной составляющей $\vec{A}$ достаточно умножить вектор $\vec{I}$ на вектор ортогональный векторам $\vec{C}$ и $\vec{S}$.

При трех фазовых сдвигах такому условию удовлетворяет вектор

$$\vec{U} = \vec{S}\times\vec{C}, \tag{9}$$

здесь символ $\times$ - обозначает векторное произведение векторов.

Матрицы оператора векторного произведения существуют только в трех- и семимерном пространствах [11]. В нашем случае это соответствует внесению трех или семи фазовых сдвигов.

В трехмерном пространстве $\delta \in R^3$

$$\vec{S}\times\vec{C} = \begin{bmatrix} 0 & S_2 & -S_1 \\ -S_2 & 0 & S_0 \\ S_1 & -S_0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

В семимерном пространстве $\delta \in R^7$

$$\vec{S}\times\vec{C} = \begin{bmatrix} 0 & S_2 & -S_1 & S_4 & -S_3 & -S_6 & S_5 \\ -S_2 & 0 & S_0 & S_5 & S_6 & -S_3 & -S_4 \\ S_1 & -S_0 & 0 & S_6 & -S_5 & S_4 & -S_3 \\ -S_4 & -S_5 & -S_6 & 0 & S_0 & S_1 & S_2 \\ S_3 & -S_6 & S_5 & -S_0 & 0 & -S_2 & S_1 \\ S_6 & S_3 & -S_4 & -S_1 & S_2 & 0 & -S_0 \\ -S_5 & S_4 & S_3 & -S_2 & -S_1 & S_0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} C_0 \\ C \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{bmatrix} \tag{11}$$

При другом числе сдвигов можно построить вектор, удовлетворяющий условиям $\left(\vec{U}\cdot\vec{C}\right)=0$ и $\left(\vec{U}\cdot\vec{S}\right)=0$. Для этого в пространстве размерностью N, $\delta \in R^N$ будем рассматривать некоторую гиперплоскость P образуемую набором N векторов V

$$P = V_0\cdot e_0 + V_1\cdot e_1 + \ldots + V_{N-1}\cdot e_{N-1} + V_N\cdot e_N + e_{N+1} = 0$$
, (12)

где e_i - коэффициенты уравнения гиперплоскости P.

Для ее построения необходимо доопределить имеющееся пространство векторов $\left\{\vec{S},\vec{C}\right\}\in R^2$ до пространства $\delta \in R^N$ набором произвольных векторов, не совпадающих с вектором $\vec{E} = \left\{\left[1\quad 1\quad \cdots\quad 1\right]_{1\times N}\right\}^T$, который параллелен вектору $\vec{A}$ (см. выражение (9)).

Коэффициенты e_i можно найти путем разложения определителя, строки которого составлены из векторов, принадлежащих данной гиперплоскости

$$\begin{vmatrix} e_0 & e_1 & \cdots & e_N & e_{N+1} \\ S_0 & S_1 & \cdots & S_N & 1 \\ C_0 & C_1 & \cdots & C_N & 1 \\ V^1{}_0 & V^1{}_1 & \cdots & V^1{}_N & 1 \\ V^2{}_0 & V^2{}_1 & \cdots & V^2{}_N & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ V^{N-2}{}_0 & V^{N-2}{}_1 & \cdots & V^{N-2}{}_N & 1 \\ V^{N-1}{}_0 & V^{N-1}{}_1 & \cdots & V^{N-1}{}_N & 1 \end{vmatrix} = 0 \qquad .(13)$$

Коэффициент e_{N+1} равен нулю, поскольку гиперплоскость натянута на радиус-векторы и, следовательно, проходит через начало системы координат, поэтому определитель (13) можно упростить и соответственно снизить его размерность на единицу.

$$\begin{vmatrix} e_0 & e_1 & \cdots & e_N \\ S_0 & S_1 & \cdots & S_N \\ C_0 & C_1 & \cdots & C_N \\ V^1{}_0 & V^1{}_1 & \cdots & V^1{}_N \\ V^2{}_0 & V^2{}_1 & \cdots & V^2{}_N \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ V^{N-1}{}_0 & V^{N-1}{}_1 & \cdots & V^{N-1}{}_N \end{vmatrix} = 0 \quad . \qquad (14)$$

Коэффициенты уравнения общего вида e_i гиперплоскости P соответственно образуют координаты вектора нормали к ней.

Например, при четырех сдвигах уравнение четырехмерной плоскости получаем, раскладывая определитель

$$\begin{vmatrix} e_0 & e_1 & e_2 & e_3 \\ \cos(\delta_0) & \cos(\delta_1) & \cos(\delta_2) & \cos(\delta_3) \\ \sin(\delta_0) & \sin(\delta_1) & \sin(\delta_2) & \sin(\delta_3) \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} . \qquad (15)$$

Тогда коэффициенты уравнения плоскости будут равны

$$e_0 = \begin{vmatrix} \cos(\delta_1) & \cos(\delta_2) & \cos(\delta_3) \\ \sin(\delta_1) & \sin(\delta_2) & \sin(\delta_3) \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} = \qquad , (16)$$
$$= \sin(\delta_1 - \delta_2) + \sin(\delta_1 - \delta_3) - \sin(\delta_2 - \delta_3)$$

$$e_1 = -\begin{vmatrix} \cos(\delta_0) & \cos(\delta_2) & \cos(\delta_3) \\ \sin(\delta_0) & \sin(\delta_2) & \sin(\delta_3) \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} = \qquad (17)$$
$$= -\sin(\delta_0 - \delta_2) - \sin(\delta_0 - \delta_3) + \sin(\delta_2 - \delta_3)$$

$$e_2 = \begin{vmatrix} \cos(\delta_0) & \cos(\delta_1) & \cos(\delta_3) \\ \sin(\delta_0) & \sin(\delta_1) & \sin(\delta_3) \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} = \qquad ,(18)$$
$$= \sin(\delta_0 - \delta_1) + \sin(\delta_0 - \delta_3) - \sin(\delta_1 - \delta_3)$$

$$e_3 = -\begin{vmatrix} \cos(\delta_0) & \cos(\delta_1) & \cos(\delta_2) \\ \sin(\delta_0) & \sin(\delta_1) & \sin(\delta_2) \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = \qquad (19)$$
$$= \sin(\delta_0 - \delta_1) + \sin(\delta_0 - \delta_2) - \sin(\delta_1 - \delta_2)$$

и тогда

$$\vec{U} = [e_0 \quad e_1 \quad e_2 \quad e_3]^T . \qquad (20)$$

Умножая полученный вектор $\vec{U}$ (9) на вектор $\vec{I}$ (8) получаем:

$$\vec{I} \cdot \vec{U} = \vec{A} \cdot \vec{U} + (B\cos\phi)\vec{C} \cdot \vec{U} - (B\sin\phi)\vec{S} \cdot \vec{U} = \vec{A} \cdot \vec{U} \qquad (21)$$

Тогда средняя яркость A может быть рассчитана с помощью следующего выражения

$$A = \frac{\vec{U} \cdot \vec{I}}{\vec{U} \cdot \vec{E}} . \qquad (22)$$

где вектор $\vec{E} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T$.

Подставляя найденное значение A в выражения (8а) и (8б) окончательно получим

$$A_r = \left\{ \frac{1}{1-n^2} \cdot \frac{\vec{U} \cdot \left(\vec{I} - \vec{I}(n)\right)}{\vec{U} \cdot \vec{E}} \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (23а)$$

и

$$A_p = \left\{ \frac{1}{1-n^2} \cdot \frac{\vec{U} \cdot \left(\vec{I}(n) - n^2 \vec{I}\right)}{\vec{U} \cdot \vec{E}} \right\}^{\frac{1}{2}} . \qquad (23б)$$

Для предотвращения усиления ошибок вектор желательно нормировать по длине $\vec{U} = \dfrac{\vec{U}}{|\vec{U}|}$.

II. КАЛИБРОВКА КОЭФФИЦИЕНТА ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОПОРНОГО ПУЧКА

Измерения амплитуды опорного пучка прямо зависят от истинных значений коэффициента пропускания n нейтрального фильтра (или иных устройств, которые используются для изменения амплитуды). Это значение нужно измерить.

Калибровку нейтрального фильтра с коэффициентом пропускания n можно получить из отношения выражений (6) и (7). Отсюда

$$n = \frac{B(n)}{B}, \quad (24)$$

Значение для определения B нами получено в

$$B = \left\{ \left(\frac{\vec{I}\cdot\vec{S}^{\perp}}{\vec{S}\cdot\vec{C}^{\perp}} \right)^2 + \left(\frac{\vec{I}\cdot\vec{C}^{\perp}}{\vec{S}\cdot\vec{C}^{\perp}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (25)$$

$$B(n) = \left\{ \left(\frac{\vec{I}(n)\cdot\vec{S}^{\perp}}{\vec{S}\cdot\vec{C}^{\perp}} \right)^2 + \left(\frac{\vec{I}(n)\cdot\vec{C}^{\perp}}{\vec{S}\cdot\vec{C}^{\perp}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (26)$$

$$n = \left\{ \frac{\left(\vec{I}(n)\cdot\vec{S}^{\perp}\right)^2 + \left(\vec{I}(n)\cdot\vec{C}^{\perp}\right)^2}{\left(\vec{I}\cdot\vec{S}^{\perp}\right)^2 + \left(\vec{I}\cdot\vec{C}^{\perp}\right)^2} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (27)$$

где $\vec{I}$ и $\vec{I}(n)$- вектора интенсивностей полученные до и после введения нейтрального фильтра в опорный пучок , $\vec{S}$, $\vec{C}$ - вектор синусов и косинусов от фазовых сдвигов соответственно и $\vec{S}^{\perp}$ и $\vec{C}^{\perp}$ - вектора ортогональные к $\vec{S}$ и $\vec{C}$. Алгоритм нахождения ортогональных векторов $\vec{S}^{\perp}$ и $\vec{C}^{\perp}$ описан в [12-15].

С другой стороны, учитывая, что ортогональные вектора интенсивностей являются разностными векторами, они не содержат постоянной составляющей, и, следовательно, пропорциональны параметру B, что позволяет получить более простое выражение для оценки коэффициента пропускания n

$$\vec{I}^{\perp} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{I}, \quad (28)$$

$$\vec{I}^{\perp}(n) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{I}(n). \quad (29)$$

Раскрывая формулы (25) и (26) получим

$$\vec{I}^{\perp} = \left[I_2 - I_1, \quad I_0 - I_2, \quad I_1 - I_0 \right]^T = \begin{bmatrix} B\left(\cos(\varphi+\delta_2) - (\varphi+\delta_1)\right) \\ B\left(\cos(\varphi+\delta_0) - (\varphi+\delta_2)\right) \\ B\left(\cos(\varphi+\delta_1) - (\varphi+\delta_0)\right) \end{bmatrix}$$

и

$$\vec{I}^{\perp}(n) = \left[I_2(n) - I_1(n), \quad I_0(n) - I_2(n), \quad I_1(n) - I_0(n) \right]^T = \begin{bmatrix} B\cdot n\left(\cos(\varphi+\delta_2) - (\varphi+\delta_1)\right) \\ B\cdot n\left(\cos(\varphi+\delta_0) - (\varphi+\delta_2)\right) \\ B\cdot n\left(\cos(\varphi+\delta_1) - (\varphi+\delta_0)\right) \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Отсюда, покомпонентное сложение элементов векторов дает

$$\frac{\sum_i \vec{I}^{\perp}(n)}{\sum_i \vec{I}^{\perp}} = \frac{3B\cdot n\cdot \tilde{I}^{\perp}}{B\cdot \tilde{I}^{\perp}} = 3n, \quad (31)$$

здесь $\tilde{I}^{\perp}$ - сумма компонент вектора $\vec{I}$ и тогда соответственно получаем

$$n = \frac{1}{3}\cdot \frac{\sum_i \vec{I}^{\perp}(n)}{\sum_i \vec{I}^{\perp}}. \quad (32)$$

Таким образом получено простое выражение для определения коэффициента пропускания. Вместе с выражением (23б) его можно использовать для нахождения амплитуды опорного пучка $A_p(x,y)$.

ВЫВОДЫ

Представлен новый метод определения амплитуды опорного пучка для двухлучевой интерференции. Используется метод пошагового фазового сдвига, в котором получают серию интерферограмм путем внесения фазового сдвига в опорное плечо интерферометра, затем в опорный пучок вводится нейтральный фильтр, и получают новую серию интерферограмм. Амплитуда опорного пучка рассчитывается по предлагаемому в статье алгоритму. Предложены способы калибровки вносимого ослабления амплитуды опорного пучка.

Учет влияния амплитудного распределения может существенно увеличить качество восстановленного изображения из цифровых голограмм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка методов сверхразрешения в цифровой голографической интерферометрии» (Грант № 16-08-00565).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Schnars, U. Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction [Text] / U. Schnars, W. Jueptner // Applied Optics. – 1994. – Vol. 33(2). – P. 179-181.
[2] Schnars, U. Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques [Text] // U. Schnars, W. Jueptner. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 164 p.
[3] Гуров, И.П. Компьютерная обработка интерференционных сигналов на основе алгоритма управляемого фазового сдвига [Текст] / И.П. Гуров // Оптический журнал. – 1998. – № 10. – С. 38-42.
[4] Современные методы цифровой голографии / С.А. Балтийский, И.П. Гуров, С. Де Никола и др. // Проблемы когерентной и нелинейной оптики; под ред. И.П. Гурова и С. А. Козлова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 91-117.
[5] Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Цифровая голография.-М.:Наука.- 1982.- 219 стр.
[6] Guzhov V. I. Phase information recovery based on the methods of phase shifting interferometry with small angles between interfering beams / V. I. Guzhov, S. P. Il'Inykh, S. V. Khaibullin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. - 2017. - Vol. 53, iss. 3. - P. 288-293. - DOI: 10.3103/S875669901703013X.
[7] Carre P. Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures// Metrologia.- 1966.- V.2.- No.1.- P.13-23.
[8] Creath K. Phase-measurement interferometry techniques// Progr. in Optics, E.Wolf, ed./ Elsevier Science Publishers, Amsterdam.- 1988.- V.XXVI, P.349-393.
[9] Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С., Вагизов А.Р. / Универсальный алгоритм расшифровки. // Научный вестник НГТУ. - 2010. - №4(41) – С. 51-58.
[10] Гужов В.И. Методы измерения 3D профиля объектов. Фазовые методы.: Учеб.пособие.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016.-83с.
[11] W. S. Massey The American Mathematical Monthly Vol. 90, No. 10 (Dec., 1983), pp. 697-701.
[12] Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия: Учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. — 252с.- (Серия «Учебники НГТУ»).
[13] V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, R.A. Kuznetsov, D.S. Haydukov, "Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry," Opt. Eng. 2013, 52(3):030501.
[14] Ильиных С.П.., Гужов В.И. Обобщенный алгоритм расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом// Автометрия.-2002.- №3. - С.123-126.
[15] Алгоритмы расшифровки интерференционных картин методом пошагового фазового сдвига. /Гужов В.И., Ильиных С.П., Кузнецов Р.А., Хайдуков Д.С.// Автоматика и программная инженерия, Новосибирск , – 2012.- №2(2) – С. 47 – 54.

Determination of the Intensity of the Reference and Object Beams when Using the Phase-Shift Interferometry

V.I. GUZHOV, S.P. IL'INYKH

Abstract: The paper considers a new method for determining the intensity of the reference and object beams. This information is necessary for the reconstitution of digital holograms. The proposed method is based on the analysis of interference patterns obtained by changing the intensity of the object beam and phase shifts.

Key words: interferometry, step-by-step phase shift, digital holography

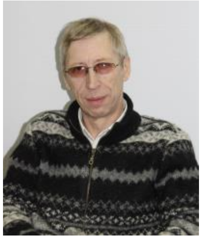
REFERENCES

[1] Schnars, U. Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction [Text] / U. Schnars, W. Jueptner // Applied Optics. – 1994. – Vol. 33(2). – P. 179-181.
[2] Schnars, U. Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques [Text] // U. Schnars, W. Jueptner. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 164 p.
[3] Gurov, I.P. Komp'juternaja obrabotka interferencionnyh signalov na osnove algoritma upravljaemogo fazovogo sdviga [Tekst] / I.P. Gurov // Opticheskij zhurnal. – 1998. – № 10. – S. 38-42.
[4] Sovremennye metody cifrovoj golografii / S.A. Baltijskij, I.P. Gurov, C. De Nikola i dr. // Problemy kogerentnoj i nelinejnoj optiki; pod red. I.P. Gurova i S. A. Kozlova. SPb.: SPbGU ITMO, 2004. S. 91-117ove algoritma upravljaemogo fazovogo sdviga [Tekst] / I.P. Gurov // Opticheskij zhurnal. – 1998. – № 10. – S. 38-42.
[5] Jaroslavskij L. P., Merzljakov N. S. Cifrovaja golografija.-M.:Nauka.- 1982.- 219 str.
[6] Guzhov V. I. Phase information recovery based on the methods of phase shifting interferometry with small angles between interfering beams / V. I. Guzhov, S. P. Il'Inykh, S. V. Khaibullin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. - 2017. - Vol. 53, iss. 3. - P. 288-293. - DOI: 10.3103/S875669901703013X.
[7] Carre P. Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures// Metrologia.- 1966.- V.2.- No.1.- P.13-23
[8] Creath K. Phase-measurement interferometry techniques// Progr. in Optics, E.Wolf, ed./ Elsevier Science Publishers, Amsterdam.- 1988.- V.XXVI, P.349-393
[9] Guzhov V.I., Il'inyh S.P., Hajdukov D.S., Vagizov A.R. / Universal'nyj algoritm rasshifrovki. // Nauchnyj vestnik NGTU. - 2010. - №4(41) – S. 51-58.
[10] Guzhov V.I. Metody izmerenija 3D profilja ob#ektov. Fazovye metody.: Ucheb.posobie.- Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2016.-83s.
[11] W. S. Massey The American Mathematical Monthly Vol. 90, No. 10 (Dec., 1983), pp. 697-701.
[12] Guzhov V.I., Il'inyh S.P. Komp'juternaja interferometrija: Ucheb. posobie. — Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004. — 252s..
[13] V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, R.A. Kuznetsov, D.S. Haydukov, "Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry," Opt. Eng. 2013, 52(3):030501.
[14] Il'inykh S.P., Guzhov V. I. / Generalized deciphering algorithm for interferograms with step-

by-step shift// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 2002, Issue 3, pp 123-126.

[15] Algoritmy rasshifrovki interferencionnyh kartin metodom poshagovogo fazovogo sdviga. /Guzhov V.I., Il'inyh S.P., Kuznecov R.A., Hajdukov D.S.// Avtomatika i programmnaja inzhenerija, Novosibirsk , – 2012.-№2(2) – S. 47 – 54.

Владимир Иванович Гужов - профессор кафедры ССОД факультета Автоматики и вычислительной техники в Новосибирского Государственного Технического университета, профессор, доктор технических наук. Автор более 200 научных работ. Область научных интересов: высокоточные интерференционные измерения.
E-mail: vigguzhov@gmail.com



Сергей Петрович Ильиных - доцент кафедры вычислительной техники НГТУ, кандидат технических наук, доцент. Является автором более 130 научных трудов. Область научных интересов: разработка алгоритмов анализа изображений в оптических измерительных системах.
E-mail: isp51@yandex.ru