

УДК 535.411.854

## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ**

**Гужов В.И., Ильиных С.П., Марченко И.О., Хайдуков Д.С.**

Новосибирский государственный технический университет

*В статье рассматривается алгоритм двумерного субпиксельного сканирования для увеличения разрешения при восстановлении цифровых голограмм. Для синтеза высокоразрешающего раstra необходимо находить решение системы линейных алгебраических уравнений большой размерности. Для ускорения вычислений система уравнений преобразуется к блочно-ленточному виду, что позволяет значительно повысить производительность вычислений. Работа поддержана грантом РФФИ № 16-08-0056516.*

**Ключевые слова:** цифровая голография, сверхразрешение, метод фазовых шагов, субпиксельный сдвиг.

Голографические методы являются одним из наиболее перспективных инструментов экспериментальных исследований и ограничения измерительных интерференционных голографических систем подробно исследованы и описаны в литературе [1,2]. Основным фактором, сдерживающим широкое использование таких систем в измерительной практике, является необходимость записи промежуточной голограммы. Для этого необходимы фотоматериалы с разрешением не менее 2000-4000 линий/мм. Максимальное разрешение оптических приборов определяется критерием Рэля и не превышает 200-300 нм [3]. Поэтому в настоящее время актуальной задачей исследований является разработка методов повышения пространственного разрешения цифровых голограмм на основе серий измерений, полученных при низком разрешении (субпиксельное сканирование).

Субпиксельное сканирование может осуществляться сдвигами фотоприемника на величину, составляющую часть пикселя по координатам  $x$  и  $y$ . Решая систему уравнений можно получить элементы высокоразрешающего раstra с точностью до величины пространственного сдвига. Современные устройства позиционирования обеспечивают сдвиг по осям  $x$  и  $y$  с шагом порядка 0.1 нм. Поэтому пространственное разрешение оптической микроскопии может быть увеличено и максимальное пространственное разрешение может быть сопоставимо

с разрешением электронных микроскопов. Однако система уравнений при сканировании с малыми шагами имеет очень большой размер.

В статье описан метод преобразования системы уравнений к блочно-ленточному виду, что позволяет значительно повысить производительность вычислений.

Общая постановка задачи сканирования описана в [4]. В результате измерений получаем набор значений интенсивностей  $I_i$  с низким разрешением, сдвинутых относительно друг друга на некоторую величину меньшую размера интегрированной апертуры. Наша задача определить высокоразрешающие элементы  $x_i$ .

Запишем систему линейных уравнений в виде:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + \dots + x_l &= I_1 \\ x_2 + x_3 + \dots + x_{l+1} &= I_2 \\ \dots & \\ x_{(n-1)l+1} + x_{(n-1)l+2} + \dots + x_{nl} &= I_{nl} \end{aligned} \quad (1)$$

Решая систему уравнений (1) путем *последовательного вычитания элементов вектора  $I$  «снизу - вверх»* получим искомый вектор элементов  $x$  высокоразрешающего растра.

Рассмотрим обобщение метода субпиксельного сканирования на двумерную область и возможность упрощения решения двумерной задачи путем ее разложения на ряд подзадач, решаемых для каждого пространственного направления отдельно. Это позволит распараллелить решение основной задачи и соответственно получить ее эффективное решение.

Пусть размер двумерного растра низкоразрешающего растра равен  $N_x$  и  $N_y$  по горизонтали и вертикали, а  $l$  и  $k$  - коэффициенты увеличения пространственного разрешения в горизонтальном и вертикальном направлениях, соответственно. Необходимый набор низкоразрешающих растров получается путем регистрации необходимого количества изображений при пространственных сдвигах в разных направлениях. Отметим, что число элементов в наборе низкоразрешающих растров должно быть равно числу элементов высокоразрешающего растра. Величина сдвига определяется следующим образом:

$$\Delta x = \frac{L_x}{l-1}, \quad \Delta y = \frac{L_y}{k-1}, \quad (2)$$

здесь  $L_x$  и  $L_y$  - линейные размеры апертуры для одного пикселя изображения по горизонтали и вертикали, соответственно.

Пусть пространственные сдвиги выполняются для всех строк изображения только в одном (горизонтальном) направлении. Очевидно, что матрица системы СЛАУ (1) в этом случае будет представлять собой блочную диагональную структуру размером  $lN_xN_y \times lN_xN_y$

$$A_x = \begin{bmatrix} B_x & \vdots & 0 \\ & B_x & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & \vdots & B_x & \\ 0 & & \vdots & & B_x \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $B_x$  - блочная матрица размером  $N_x l \times N_x l$ , соответствующая матрице системы уравнений (1).

Отметим, что каждый блок  $B_x$  описывает одну строку высококонтрастного решателя раstra. В этом случае блок  $B_x$  представляет собой наддиагональную матрицу ширины ленты, которой равна величине коэффициента  $l$ .

$$B_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & & & 0 \\ & 1 & \vdots & 1 & 1 \\ & & & 1 & 1 \\ & & & \dots & \\ & & & & 1 & 1 & 1 \\ & & & & \vdots & 1 & 1 \\ & & & & & \dots & \\ 0 & & & & & & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Система уравнений (1) будет выглядеть следующим образом

$$A_x \cdot X = I, \quad (5)$$

В случае (5) вектор  $I$  составляется путем последовательной развертки строк низкоразрешающих растров согласно описанному ранее правилу.

Вычисление элементов синтезируемого растра также выполняется путем вычитания элементов вектора  $I$  «снизу - вверх» (т.е. начиная с конца вектора). Полученный вектор  $X$  представляет собой развертку искомого синтезируемого растра  $H$  по строкам. Окончательно искомый растр получается путем сборки вектора  $X$  по строкам.

Достаточно простое решение получается, когда из набора матриц со сдвигом в одном направлении, например, по горизонтали с фиксированным сдвигом по вертикали формируется набор матриц с увеличением разрешения в одном направлении, а затем из полученного набора формируется результирующая матрица с увеличением разрешения в другом направлении.

Проведем компьютерное моделирование этого процесса. Для этого отсканируем участок голограммы 3,5 мм с разрешением 2048x2048 пикселя. Голограмма фиксировалась в области Фраунгофера, поэтому для восстановления их нее изображения использовалось преобразование Фурье [5]. Из этой голограммы получим четыре голограммы размером 1024x1024 следующим образом: первая голограмма  $P_1$  - усреднением значений по площадке 2x2 пикселя (без сдвига), вторая  $P_2$  - усредним значения на площадке 2x2 пикселя со сдвигом голограммы по оси  $x$  на один пиксель, что соответствует сдвигу на половину пикселя голограммы после ее усреднения, третья  $P_3$  - со сдвигом на один пиксель по оси  $y$ , четвертая  $P_4$  - со сдвигом на один пиксель по осям  $x$  и  $y$ .

Из набора матриц  $P$  согласно изложенному алгоритму, формируем две матрицы с разрешением 1024x2048,  $H_1 = \{P_1, P_2\}$  и  $H_2 = \{P_3, P_4\}$ , соответственно.

Затем из полученных голограмм находим результирующую матрицу  $H = \{H_1, H_2\}$  с требуемым разрешением 2048x2048 (рисунок 1).

На рисунке 2 показаны результаты восстановления действительно и мнимого изображений из цифровых голограмм с малым разрешением и после 2x-кратного увеличения пространственного разрешения путем субпиксельного сканирования.

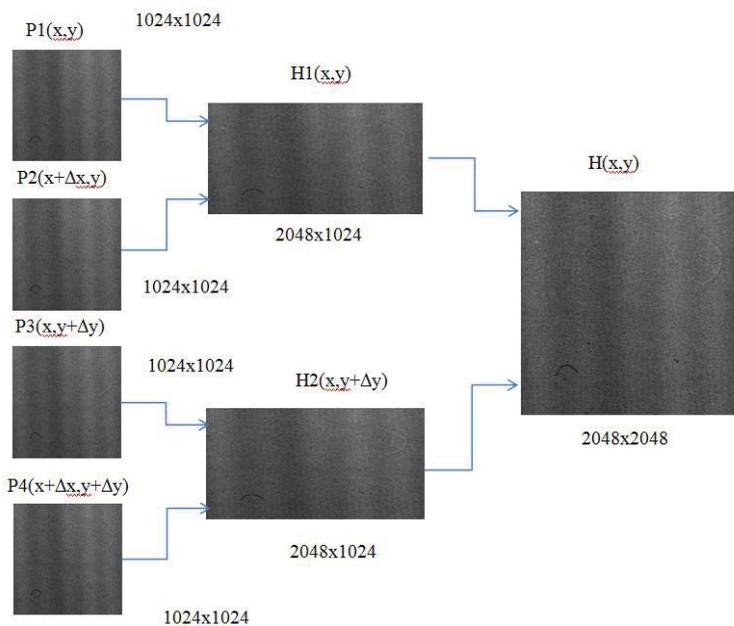


Рисунок 1 - Последовательность синтеза высокоразрешающего растра

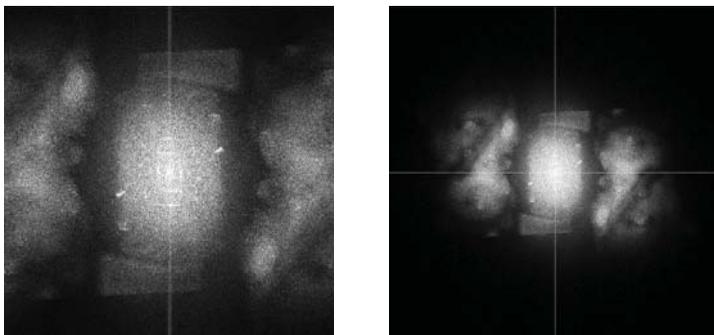


Рисунок 2 – Результат восстановления цифровой голограммы формата 1024x1024 - слева и 2048x2048 - справа

Предлагаемый в статье метод решения системы линейных алгебраических уравнений, получаемых при двумерном субпиксельном сканировании, позволяет эффективно использовать технологию GPGPU и

выполнять генерацию высокоразрешающих растров в реальном масштабе времени.

### **Литература:**

1. Gabor D. A new microscopic principle / Nature. – 1948. – Vol. 161. – P. 777-778.
2. Автоматизация обработки интерференционных картин при исследовании полей деформаций / Герасимов С.И., Гужов В.И., Жилкин В.А., Козачок А.Г. // Заводская лаборатория. – 1985. – №4. – С. 77-80.
3. Kim M.K. Principles and techniques of digital holographic microscopy // SPIE Reviews. – 2010. – Vol.1. – P. 018005-1 – 018005-50.
4. Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайбулин С.В. Методы сверхразрешения в цифровых голографических системах // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XIII науч. практ. конф. – Сочи, 2016. – С. 215-218.
5. Гужов В.И., Емельянов В.А., Хайдуков Д.С. Область возможного применения дискретных преобразований Фурье и Френеля // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – Т. 15, №1. – С. 97–103.

### **Trajectory analysis of interference signals**

**V.I. Gushov, S.P. Ilinykh, I.O. Marchenko, D.S. Haydukov**

Novosibirsk State Technical University

*In article the algorithm of two-dimensional sub-pixel scanning to increase the resolution in the digital holograms. For the synthesis of high-resolution raster it is necessary to find solution of system of linear algebraic equations of large dimension. To speed up the computations the system of equations is converted to a block-tape mind that allows you to significantly improve calculation performance. This work was supported by RFBR grant No. 16-08-0056516.*

**Keywords: interferogram, phase shift, phase profile, trajectory, interferometry.**

УДК 001.891.572

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ ГРУПП**

**Демьяненко А.В., Демьяненко О.Н., Яковина И.Н.**

Новосибирский государственный технический университет