ISSN 1814-1196 Научный вестник НГТУ том 67, № 2, 2017, с. 83–93 http://journals.nstu.ru/vestnik Science Bulletin of the NSTU Vol. 67, No. 2, 2017, pp. 83–93

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

INFORMATION PROCESSING

УДК 535.411.854

Быстрый алгоритм синтеза высокоразрешающих растров в цифровой голографии^{*}

В.И. ГУЖОВ¹, С.П. ИЛЬИНЫХ², Д.С. ХАЙДУКОВ³, И.О. МАРЧЕНКО⁴

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: vigguzhov@gmail.com

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: isp51@yandex.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, ассистент. E-mail: demon-angelok@yandex.ru

⁴ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: i.o.marchenko@gmail.com

В статье рассматривается обобщенный алгоритм двумерного субпиксельного сканирования для увеличения разрешения при записи цифровых голограмм. В данном подходе формируется набор кадров с низким разрешением, из которого синтезируется высокоразрешающий растр, с числом пикселей, равным общему числу пикселей низкоразрешающих кадров. Это необходимо для разработки цифровых голографических систем с пространственным разрешением 1000...3000 лин/мм и более. Однако время синтезирования кадра является существенным ограничением для использования подобных алгоритмов. Для синтеза высокоразрешающего растра необходимо находить решение системы линейных алгебраических уравнений большой размерности. Для ускорения вычислений система уравнений преобразуется к блочноленточному виду, что позволяет значительно повысить производительность вычислений. Нахождение решения системы уравнений производительность вычислений. Нахождение решения системы уравнений производительность вычислений. нахождение решения системы уравнений производится для каждого блока независимо. Это позволяет использовать в качестве вычислителя графический процессор, выполняющий параллельные вычисления (технология GPGPU/CUDA).

Данный подход позволяет значительно ускорить время синтеза высокоразрешающего изображения и выполнять его в режиме реального времени. Предложенный метод повышения разрешающей способности матричных фотоприемников может быть использован при решении широкого класса прикладных задач голографической интерферометрии и построения высокоточных оптических систем измерения рельефа.

Ключевые слова: цифровая голография, интерферометрия, пространственный сдвиг, сверхразрешение, субпиксельное сканирование, голограмма, фотоматрица, графический процессор, технология GPGPU, CUDA

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-83-93

^{*} Статья получена 14 февраля 2017 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту № 16-08-00565.

введение

Голографические методы являются одним из наиболее перспективных инструментов экспериментального исследования и анализа напряженнодеформированного состояния. Измерительные голографические системы нашли достаточно широкое применение в экспериментальной механике в 1970–1990 гг., их возможности и ограничения подробно исследованы и описаны в литературе [1–7].

Основным критерием работы голографической системы является разрешающая способность регистрирующих сред. Фотоматериалы, используемые в голографии, имеют разрешающую способность порядка нескольких тысяч линий на миллиметр. Попытки замены фотоматериалов термопластическими средами не решают данной проблемы из-за малого числа циклов записичтения и недостаточного пространственного разрешения. Тем не менее работы в этом направлении продолжаются по настоящее время [8].

В современных цифровых голографических системах регистрация голограмм производится с помощью ССD и CMOS фотоматриц. Характерные величины регистрируемых с помощью таких устройств изображений имеют порядок 5000×4000 пикселей (20 Mpixel) при размерах пикселя 1...5 микрометров. В 2015 г. фирма Canon анонсировала разработку CMOS матрицы с разрешением 250 мегапикселей размера APS-H (29,2×20,2 мм). Разрешение матрицы – 19 580×12 600 пикселей.

Разработчики CMOS матриц считают разрешение системы равным количеству считываемых с матрицы пикселей, разделенному на 1,5. Поскольку при оценке разрешающей способности объектива принято измерение в парах черной и белой линий миры Фуко на миллиметр (определяющих не одиночный пик, а пространственную частоту), то коэффициент пересчета разрешения матрицы в пары линий требует поправочного коэффициента 3,0. При таком пересчете даже у наиболее современной матрицы разрешение не превышает 224 лин/мм.

Поэтому внимание многих исследователей посвящено вопросам синтеза высокоразрешающего изображения на основе группы изображений одного и того же объекта, имеющих более низкое разрешение [9–12]. В радиотехнике данный подход называется синтезированной апертурой (synthetic aperture). В литературе такие методы часто называются методами «сверхразрешения».

В работе [13] реализован сверхразрешающий растр размером 12 100×18 000 пикселей из набора кадров с разрешением 1200×1600. Общее число кадров 21×21. Время формирования растра составило 9 ч 19 мин. Конечно, такое время обработки для практических приложений является неприемлемым. Поэтому целью данной статьи является разработка быстрого двумерного алгоритма синтеза высокоразрешающих растров при произвольном числе пространственных сдвигов.

АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУБПИКСЕЛЬНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Метод повышения пространственного разрешения основан на синтезе высокоразрешающего растра из набора низкоразрешающих растров, полученных смещением изображения объекта на субпиксельную величину. Смещение растра может осуществляться, например, с помощью устройства, описанного в работе [15]. Сдвиг может быть осуществлен с помощью микроисполнительных механизмов. Привод может сместить детектор (рис. 1, a) или он может быть использован для сдвига наклонной стеклянной пластины (рис. 1, δ), для оптического смещения изображения по отношению к статическому детектору.



Рис. 1. Два способа формирования изображения на матрице детектора со сдвигом на субпиксельную величину

Смещение может быть также реализовано сдвигом непосредственно самого объекта с помощью двухкоординатного сканирующего столика [16].

Современные устройства позиционирования обеспечивают сдвиг по осям x и y с шагом 0,1 нм. Размер пикселя является постоянным и зависит от вида используемого устройства регистрации. При среднем размере пикселя в матричных фотоприемниках порядка 1–5 мкм можно обеспечить сдвиг на 1/10 пикселя.

Наименьшим элементом изображения является пиксель. На рис. 2 показана схема одномерного варианта алгоритма, в котором пространственный сдвиг составляет 1/3 размера пикселя [14]. Берется три изображения с низким разрешением и строится синтезированное изображение с размером пикселя в 3 раза меньшим и соответственно в 3 раза большим разрешением.

Ниже представлено обобщение метода субпиксельного сдвига [14] на двумерный случай при произвольном числе пространственных сдвигов. Число сдвигов по вертикали и горизонтали пропорционально коэффициентам увеличения разрешения.

Для синтеза высокоразрешающего растра необходимо составить систему линейных алгебраических уравнений

$$Q \cdot A = P \,, \tag{1}$$

где Q – матрица системы; P – вектор, состоящий из элементов низкоразрешающих растров, и A – вектор, состоящий из элементов высокоразрешающего растра.

Отметим, что для того чтобы система уравнений (1) была определенной, число элементов в наборе низкоразрешающих растров должно быть равно числу элементов высокоразрешающего растра N. В нашем случае

$$N = (N_x m)(N_v n).$$
⁽²⁾



Рис. 2. Схема расположения исходных низкоразрешающих изображений (I1, I2, I3) при сдвиге на 1/3 пикселя. Нижний рисунок – синтезированное изображение (Is)

Для наглядности рассмотрим предлагаемый алгоритм при числе точек в матрице фотоприемника $N_x = 2$, $N_y = 1$ и коэффициентах увеличения (количестве сдвигов одного пикселя) m = 4 по горизонтали и n = 3 по вертикали. На рис. 3 показаны варианты размещения высокоразрешающего и низкоразрешающих растров при различных пространственных положениях фотоприемника. Здесь элементы высокоразрешающего растра $a11\cdots a38$ (их необходимо определить), а элементы, заключенные в толстую рамку, соответствуют одному элементу регистрирующей фотоматрицы, смещаемой на субпиксельную величину по вертикали и горизонтали соответственно.

00P1 00P2	10P1 10P2	20P1 20P2	30P1 30P2
a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18	a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18 0	a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18 0 0	a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18 0 0 0
a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28	a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28 0	a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28 0 0	a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28 0 0 0
a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38	a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 0	a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 0 0	a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 0 0 0
Экран	Экран	Экран	Экран
01P1 01P2	11P1 11P2	21P1 21P2	31P1 31P2
a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18	a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18	a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18	a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18
a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28	a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28 0	a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28 0 0	a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28 0 0
a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38	a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 0	a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 0 0	a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	
02P1 02P2	12P1 12P2	22P1 22P2	32P1 32P2
a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18	a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18	a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18	a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18
a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28	a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28	a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28	a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28
a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38	a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 0	a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 0 0	a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0

Рис. 3. Заполнение растров при различных положениях матрицы фотоприемника

Здесь mnPi – обозначение *i*-го элемента низкоразрешающего растра со сдвигами (m,n). Так, например, обозначение элемента растра $12P_1$ – соответствует сдвигу первого пиксела низкоразрешающего растра P1 на один элемент высокоразрешающего растра по горизонтали и на два элемента по вертикали.

Сопоставляя положение элементов высокоразрешающих растров с элементами низкоразрешающего растра (рис. 3) получим систему линейных уравнений (1).

- .																							-	г ¬			
I	I	I	I					I	I	I	I					I	I	I	I					<i>a</i> ₁₁		$_{00}P_1$	
	1	1	1	1					1	1	1	1					1	1	1	1				<i>a</i> ₁₂		${}_{10}P_1$	
		1	1	1	1					1	1	1	1					1	1	1	1			<i>a</i> ₁₃		${}_{20}P_1$	
			1	1	1	1					1	1	1	1					1	1	1	1		a ₁₄		$_{30}P_{1}$	
				1	1	1	1					1	1	1	1					1	1	1	1	a15		$_{00}P_{2}$	
					1	1	1						1	1	1						1	1	1			$10P_2$	
						1	1						•	1	1						•	1	1	a.		10^{-2}	
						1	1							1	1							1	1			20 ¹ 2	
							1	1							1	1	1		1				1	a_{18}		$_{30}P_2$	
								I	1	I	1					I	1	1	1					$ a_{21} $		$_{01}P_{1}$	
									1	1	1	1					1	1	1	1				a ₂₂		${}_{11}P_1$	
										1	1	1	1					1	1	1	1			<i>a</i> ₂₃		${}_{21}P_1$	
											1	1	1	1					1	1	1	1		a ₂₄	_	$_{31}P_1$	(2)
												1	1	1	1					1	1	1	1	a25	=	$_{01}P_2$	(3)
													1	1	1						1	1	1	a ₂₆		$_{11}P_2$	
														1	1							1	1	a27		$_{21}P_{2}$	
															1								1	ano 1		21 2 $21 P_2$	
																1	1	1	1					a20		31^{-2}	
																1	1	1	1	1				<i>u</i> 31		0211 D	
																	1	1	1	1	1			<i>u</i> ₃₂		12 <i>Г</i> 1	
																		1	1	1	1			a ₃₃		$22P_1$	
																			1	1	1	1		<i>a</i> ₃₄		$_{32}P_1$	
																				1	1	1	1	<i>a</i> ₃₅		$_{02}P_2$	
																					1	1	1	a ₃₆		$_{12}P_2$	
																						1	1	a ₃₇		$_{22}P_2$	
																							1	a ₃₈		$_{32}P_2$	

Можно увидеть, что матрица системы (3) имеет блочную структуру

$$Q = \begin{bmatrix} B & B & B \\ B & B \\ & & B \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где блок В имеет ленточную структуру

Ширина ленты определяется коэффициентом увеличения растра по горизонтали (*m*), число ее элементов на главной диагонали равно числу элементов высокоразрешающего растра по горизонтали ($N_x \cdot m$), а число блоков на главной диагонали равно числу строк ($N_y \cdot n$) соответственно.



Путем вычитания строк матрицу системы (4) можно привести к блочнодиагональному виду (6).

Очевидно, что в этом случае система уравнений (3) распадается на независимые блоки, которые могут рассчитываться методом обратной прогонки [16] параллельно.

Некоторым недостатком такого подхода является падение контраста синтезированного высокоразрешающего растра по сравнению с контрастом низкоразрешающего растра. Падение контраста обусловлено тем, что один низкоразрешающий пиксель содержит в себе несколько высокоразрешающих пикселей, т. е. контраст падает в $K = m \times n$ раз. Поэтому для сохранения динамического диапазона рассчитанные значения яркости каждого из пикселей высокоразрешающего изображения необходимо увеличить в K раз.

Для проверки предлагаемого алгоритма синтеза высокоразрешающего растра (коэффициенты повышения разрешения m = 4 по горизонтали и n = 3 по вертикали соответственно) был получен набор из 12 низкоразрешающих растров размером 64×64 пикселя при различных субпиксельных сдвигах фотоматрицы (рис. 4). Затем был синтезирован высокоразрешающий растр размером 256×192 пикселей (рис. 5 справа).

ΑБ	АБ	АБ	АБ
ΑБ	ΑБ	ΑБ	ΑБ
ΑБ	ΑБ	ΑБ	ΑБ

Рис. 4. Набор 12 кадров с низким разрешением со сдвигом 0, 1/4, 1/2 и 3/4 пикселя по горизонтали (первая строка), с вертикальным сдвигом на 1/3 и 2/3 пикселя (вторая и третья строка соответственно)



Рис. 5. Кадр с низким разрешением (слева) и синтезированный растр с увеличенным разрешением (справа)

Для построения цифровых голографических систем необходимо разрешение не менее 200...400 нм. Размер одного датчика матричных фотоприемников в настоящее время составляет около 1...5 мкм. Таким образом, необходимо около 20×20 кадров с субпиксельным смещением. При размере одного кадра 1200×1600 число вычислений достаточно велико. Однако, система уравнений (6) имеет блочно-ленточную систему, поэтому каждый блок может вычисляться независимо от других.

Использование метода обратной прогонки и реализация вычислений с использованием распараллеливания вычислений каждого блока на графических процессорах (GPU) позволяет сократить время синтеза высокоразрешающего растра до 5...10 минут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезирование высокоразрещающих растров из набора кадров позволяет повысить разрешающую способность цифровых голограмм. Это необходимо для разработки цифровой голографической системы с пространственным разрешением 1000...3000 лин/мм и более. Однако время синтезирования кадра является существенным ограничением для использования подобных алгоритмов.

Предлагаемый в работе подход позволит использовать для решения систем алгебраических уравнений графические процессоры. Это позволит сократить время для получения растров с разрешением 200...400 нм до нескольких минут.

Рассмотренный метод повышения разрешающей способности матричных фотоприемников может быть использован при решении широкого класса прикладных задач голографической интерферометрии [19, 20] и построения высокоточных оптических систем измерения рельефа [21, 22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973. – 698 с.

2. Александров Е.Б., Бонч-Бруевич А.М. Исследование поверхностных деформаций с помощью голограммной техники // ЖТФ. – 1967. – Т. 37, вып. 2. – С. 360–365.

 Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. – М.: Машиностроение, 1984. – 176 с.

4. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1977. – 340 с.

5. Вест Ч. Голографическая интерферометрия: пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 503 с.

6. Автоматизация обработки интерференционных картин при исследовании полей деформаций / С.И. Герасимов, В.И. Гужов, В.А. Жилкин, А.Г. Козачок // Заводская лаборатория. – 1985. – Т. 51, № 4. – С. 77–80.

7. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 252 с.

8. New recording materials for the holographic industry / D. Jurbergs, F.-K. Bruder, F. Deuber, T. Fäcke, R. Hagen, D. Hönel, T. Rölle, M.-S. Weiser, A. Volkov // Practical Holography XXIII: Materials and Applications / ed. by H.I. Bjelkhagen, R.K. Kostuk. – Bellingham, WA: SPIE, 2009. – Art. 72330K. – (Proceedings of SPIE; vol. 7233).

9. Super-resolution in digital holography by a two-dimensional dynamic phase grating / M. Paturzo, F. Merola, S. Grilli, S. De Nicola, A. Finizio, P. Ferraro // Optics Express. – 2008. – Vol. 16. – P. 17107–17118.

10. Claus D. High resolution digital holographic synthetic aperture applied to deformation measurement and extended depth of field method // Applied Optics. -2010. - Vol. 49 (16). - P. 3187-3198.

11. *Tippie A.E., Kumar A., Fienup J.R.* High-resolution synthetic-aperture digital holography with digital phase and pupil correction // Optics Express. – 2011. – Vol. 19, N 13. – P. 12027–12038.

12. Васьков С.Т., Ефимов В.М., Резник А.Л. Быстрая цифровая реконструкция сигналов и изображений по критерию минимума энергии // Автометрия. – 2003. – Т. 39, № 4. – С. 13–20.

13. Super-resolution without explicit subpixel motion estimation / H. Takeda, P. Milanfar, M. Protter, M. Elad // IEEE Transactions on Image Processing. – 2009. – Vol. 18 (9). – P. 1958–1975.

14. *Thornton M.W., Atkinson P.M., Holland D.A.* Sub-pixel mapping of rural land cover objects from fine spatial resolution satellite sensor imagery using super-resolution pixel-swapping // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27 (3). – P. 473–491.

15. Ben-Ezra M., Zomet A., Nayar S.K. Video super-resolution using controlled subpixel detector shifts // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2005. – Vol. 27, no. 6. – P. 977–987.

16. Блажевич С.В., Селютина Е.С. Повышение разрешения цифрового изображения с использованием субпиксельного сканирования // Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. – 2014. – Т. 5 (176), вып. 34. – С. 186–190.

17. Ratis XY(Z) – двухкоординатный плоскопараллельный сканер [Электронный реcypc]. – URL: http://www.nanoscantech.com/ru/products/stage/stage-76.html (дата обращения: 15.06.2017).

18. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления. – М.: Мир, 1999. – 548 с.

19. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // Автометрия. – 1992. – № 6. – С. 24.

20. Решение проблемы фазовой неоднозначности методом цифровой интерферометрии / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, А.Р. Вагизов // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 85–91.

21. Новый метод калибровки фазовых сдвигов / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, Р.А. Кузнецов // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 1. – С. 185–189.

22. Гужов В.И., Ильиных С.П., Уберт А.Г. Проекционный метод измерения рельефа объекта // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1. – С. 23–28.

23. Гужов В.И. Методы измерения 3D профиля объектов: фазовые методы: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 83 с.

24. Робастный алгоритм расшифровки интерферограмм / С.П. Ильиных, В.И. Гужов, Н.Е. Кафидова, Д.Д. Бочаров // Автометрия. – 2005. – Т. 41, № 3. – С. 122–125.

Гужов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – оптические информационно-измерительные системы. Автор более 200 научных публикаций. E-mail: vigguzhov@gmail.com

Ильиных Сергей Петрович, доцент кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета, кандидат технических наук. Основное направление научных исследований – лазерные измерительные системы, обработка изображений. Автор более 130 научных публикаций. E-mail: isp51@yandex.ru.

Хайдуков Дмитрий Сергеевич, ассистент кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета, кандидат технических наук. Автор более 20 научных работ. Область научных интересов – расшифровка интерферограмм, цифровая голография. E-mail: demon-angelok@yandex.ru.

Марченко Илья Олегович, доцент кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета, кандидат технических наук. Автор 25 научных работ. Область научных интересов – интеллектуальные датчики. E-mail: i.o.mar-chenko@gmail.com.

A quick algorithm of high-resolution raster synthesis for digital holography^{*}

V.I. GUZHOV¹, S.P. ILINYKH², D.S. KHAIDUKOV³, I.O. MARCHENKO⁴

¹Novosibirsk State Technical University, D. Sc. (Eng.), professor; 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: vigguzhov@gmail.com

² Novosibirsk State Technical University, PhD (Eng.), professor; 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: isp51@yandex.ru ³ Novosibirsk State Technical University, PhD (Eng.), assistant lecturer; 20, K. Marx Prospekt,

Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: demon-angelok@yandex.ru

⁴Novosibirsk State Technical University, PhD (Eng.), associate professor; 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: i.o.marchenko@gmail.com

The article discusses a generalized algorithm for two-dimensional subpixel scanning to increase resolution when recording digital holograms. This approach generates a set of low resolution frames from which a high-resolution raster is synthesized in which the number of pixels equals the total number of pixels of low-resolution frames. It is necessary for the development of digital holographic systems with a spatial resolution of 1000-3000 Lin. /mm and more. However, the time of synthesizing a frame is a significant limitation for using such algorithms. For the synthesis of high-resolution raster it is necessary to find a solution of a system of linear algebraic equations of large dimension. To speed up computations a system of equations is converted to a block-tape type that allows you to significantly improve calculation performance. Finding solutions of a system of equations is performed for each block independently. This allows you to use a graphic processor as a calculator that performs parallel computing (GPGPU/CUDA). This approach can significantly speed up the synthesis of a high-resolution image and run it in real time. The proposed method of increasing the resolution of area imagers can be used to solve a wide class of applied problems of holographic interferometry and highprecision construction of optical systems to measure the topography.

Keywords: digital holography, interferometry, spatial shift, superresolution, subpixel scanning, hologram, photomatrix, GPU, GPGPU technology, CUDA

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-83-93

REFERENCES

1. Collier R.J., Burckhhardt C.B., Lin L.H. Optical holography. New York, Academic Press, 1971 (Russ. ed.: Kol'er R., Berkkhart K., Lin L. Opticheskava golografiya. Moscow, Mir Publ., 1973. 698 p.).

2. Aleksandrov E.B., Bonch-Bruevich A.M. Issledovanie poverkhnostnykh deformatsii s pomoshch'yu gologrammnoi tekhniki [Research of superficial deformations by means of the gologrammny equipment]. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics, 1967, vol. 37, iss. 2, pp. 360-365. (In Russian).

3. Kozachok A.G. Golograficheskie metody issledovaniya v eksperimental'noi mekhanike [Holographic methods of research in experimental mechanics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 176 p.

4. Ostrovskii Yu.I., Butusov M.M., Ostrovskaya G.V. Golograficheskaya interferometriya [Holographic interferometry]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 340 p.

5. Vest Ch.M. Holographic interferometry. New York, Wiley, 1979 (Russ. ed.: Vest Ch. Golograficheskaya interferometriya. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1982. 503 p.).

6. Gerasimov S.I., Guzhov V.I., Zhilkin V.A., Kozachok A.G. Avtomatizatsiya obrabotki interferentsionnykh kartin pri issledovanii polei deformatsii [Automatic processing of fringe patterns in the study of deformation fields]. Zavodskaya laboratoriya – Industrial laboratory, 1985, vol. 51, no. 4, pp. 77-80. (In Russian).

7. Guzhov V.I., Il'inykh S.P. Komp'yuternaya interferometriya [Computer interferometry]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 252 p.

8. Jurbergs D., Bruder F.-K., Deuber F., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Rölle T., Weiser M.-S., Volkov A. New recording materials for the holographic industry. Practical Holography XXIII: Materials and Applications. Ed. by H.I. Bjelkhagen, R.K. Kostuk. Proceedings of SPIE, vol. 7233. Bellingham, WA, SPIE, 2009, art. 72330K.

^{*} Received 14 February 2017.

9. Paturzo M., Merola F., Grilli S., De Nicola S., Finizio A., Ferraro P. Super-resolution in digital holography by a two-dimensional dynamic phase grating. *Optics Express*, 2008, vol. 16, pp. 17107–17118.

10. Claus D. High resolution digital holographic synthetic aperture applied to deformation measurement and extended depth of field method. *Applied Optics*, 2010, vol. 49 (16), pp. 3187–3198.

11. Tippie A.E., Kumar A., Fienup J.R. High-resolution synthetic-aperture digital holography with digital phase and pupil correction. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 13, pp. 12027–12038.

12. Vas'kov S.T., Éfimov V.M., Reznik A.L. Bystraya tsifrovaya rekonstruktsiya signalov i izobrazhenii po kriteriyu minimuma energii [Fast digital reconstruction of signals and images by the criterion of minimum energy]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 13–20. (In Russian).

13. Takeda H., Milanfar P., Protter M., Elad M. Super-resolution without explicit subpixel motion estimation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, vol. 18 (9), pp. 1958–1975.

14. Thornton M.W., Atkinson P.M., Holland D.A. Sub-pixel mapping of rural land cover objects from fine spatial resolution satellite sensor imagery using super-resolution pixel-swapping. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27 (3), pp. 473–491.

15. Ben-Ezra M., Zomet A., Nayar S.K. Video super-resolution using controlled subpixel detector shifts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, vol. 27, no. 6, pp. 977–987.

16. Blazhevich S.V., Selyutina E.S. Povyshenie razresheniya tsifrovogo izobrazheniya s ispol'zovaniem subpiksel'nogo skanirovaniya [Sub-pixel scanning to produce super-resolution digital images]. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Fizika – Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics and Physics, 2014, vol. 5 (176), iss. 34, pp. 186–190.

17. Ratis XY(Z) – dvukhkoordinatnyi ploskoparallel'nyi skaner [Ratis XY(Z) – 3D planeparallel nano piezo scanning stage]. Available at: http://www.nanoscantech.com/ru/products/stage/ stage-76.html (accessed 15.06.2017).

18. Golub G.H., Van Loan C.F. *Matrix computations*. 2nd ed. Baltimore, Md., Johns Hopkins University Press, 1989 (Russ. ed.: Golub Dzh., Van Loun Ch. *Matrichnye vychisleniya*. Moscow, Mir Publ., 1999. 548 p.).

19. Guzhov V.I., Solodkin Yu.N. Analiz tochnosti opredeleniya polnoi raznosti faz v tselochislennykh interferometrakh [Analysis of the accuracy of determining the total phase difference in integer interferometers]. Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 1992, no. 6, p. 24. (In Russian).

20. Guzhov V.I., Il'inyh S.P., Kuznetsov R.A., Vagizov A.R. Reshenie problemy fazovoi neodnoznachnosti metodom tsifrovoi interferometrii [Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 85–91. (In Russian).

21. Guzhov V.I., Il'inykh S.P., Khaidukov D.S., Kuznetsov R.A. Novyi metod kalibrovki fazovykh sdvigov [A new method of calibration phase shifts]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 1, pp. 185–189.

22. Guzhov V.I., Il'inykh S.P., Ubert A.G. Proektsionnyi metod izmereniya rel'efa ob"ekta [Projection method for measuring the topography of the object]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1, pp. 23–28.

23. Guzhov V.I. *Metody izmereniya 3D profilya ob"ektov: fazovye metody* [Methods for measuring 3D profile of objects. Phase methods]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 83 p.

24. Il'inykh S.P., Guzhov V.I., Kafidova N.E., Bocharov D.D. Robastnyi algoritm rasshifrovki interferogramm [Robust interferogram decoding algorithm]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2005, vol. 41, no. 3, pp. 122–125. (In Russian).

ISSN 1814-1196, http://journals.nstu.ru/vestnik Science Bulletin of the NSTU Vol. 67, No 2, 2017, pp. 83–93