

ISSN 1814-1196



НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НГТУ

№ 2(67)

НОВОСИБИРСК
2017

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1111

№ 2 (67)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Бобобеков К.М. О структурных преобразованиях многоканальных линейных систем в матричном полиномиальном представлении.....

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ

Алексеев А.В., Новицкий Н.Н. Компьютерная технология «АНГАРА» для интеграции информационного и вычислительного пространства при моделировании трубопроводных систем.....

Аравенков А.А., Пасынков Ю.А. Исследование влияния спектра широтно-импульсного сигнала на погрешность определения амплитуды гармоник в анализаторе гармоник на основе широтно-импульсной модуляции.....

Гибин И.С. Оптико-электронный коррелятор с временным интегрированием.....

Мотиенко А.И., Басов О.О., Бизин М.М. Система поддержки принятия решений о спасении пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах.....

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С., Марченко И.О. Быстрый алгоритм синтеза высокоразрешающих растров в цифровой голографии.....

Еделев А.В., Береснева Н.М. Особенности модельных исследований проблемы обеспечения энергетической безопасности России.....

Малышев В.В., Сливкин С.С., Рукавишников В.С., Базаркин Е.В. Применение методов машинного обучения для построения рекомендательной системы отбора анкет абитуриентов.....

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Гайдук А.Р., Дьяченко А.А., Капустян С.Г., Плаксиенко Е.А. Алгоритмы автономного группового управления горизонтальными движениями БЛА.....

Колесенков А.Н. Технологические аспекты геоинформационной системы индексации и распространения аэрокосмических изображений.....

Абденов А.Ж., Котов Ю.А., Санина О.В. Значения некоторых униграммных характеристик русскоязычных текстов.....

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 синтеза 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 блочно-ленточному виду, что позволяет значительно повысить 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 напряженно-деформированного 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 записывания и недостаточного пространственного разрешения. Тем не менее работы в этом направлении продолжают по настоящее время [8].

В современных цифровых голографических системах регистрация голограмм производится с помощью CCD 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 ($29,2 \times 20,2$ мм). Разрешение матрицы – $19\,580 \times 12\,600$ 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 мира 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 $12\,100 \times 18\,000$ 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. Сме-

щение 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, а) или он может быть использован для сдвига наклонной стеклянной пластины (рис. 1, б), для оптического смещения изображения по отношению к статическому детектору.

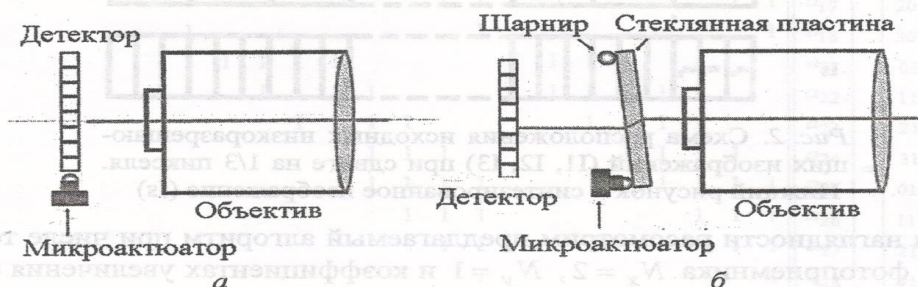


Рис. 1. Два способа формирования изображения на матрице детектора со сдвигом на субпиксельную величину

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

$$Q \cdot A = P, \quad (1)$$

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

$$N = (N_x m)(N_y n). \quad (2)$$

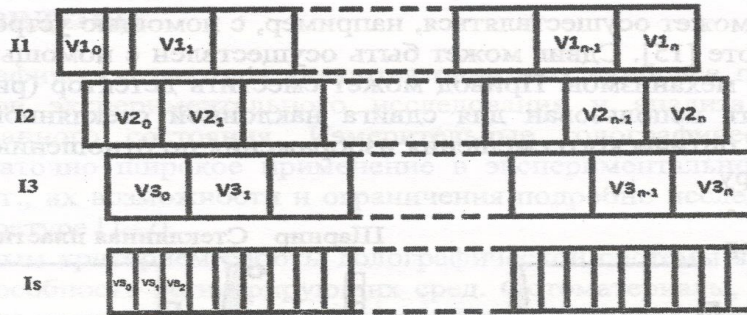


Рис. 2. Схема расположения исходных низкоразрешающих изображений (I1, I2, I3) при сдвиге на $1/3$ пикселя. Нижний рисунок – синтезированное изображение (Is)

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 раstra $a11 \dots a38$ (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
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
Экран		Экран		Экран		Экран		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
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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Экран		Экран		Экран		Экран		Экран		Экран		Экран		Экран	
02P1		02P2		12P1		12P2		22P1		22P2		32P1		32P2	
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
a31	a32	a33	a34	a35	a36	a37	a38	a31	a32	a33	a34	a35	a36	a37	a38
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Экран		Экран		Экран		Экран		Экран		Экран		Экран		Экран	

Рис. 3. Заполнение растров при различных положениях матрицы фотоприемника

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

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

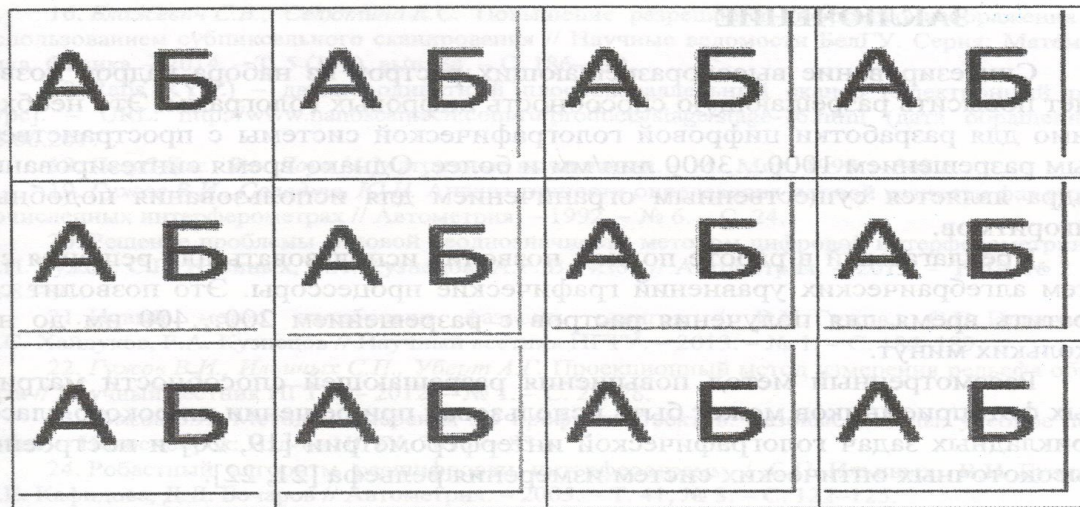


Рис. 4. Набор 12 кадров с низким разрешением со сдвигом 0, 1/4, 1/2 и 3/4 пикселя по горизонтали (первая строка), с вертикальным сдвигом на 1/3 и 2/3 пикселя (вторая и третья строка соответственно)

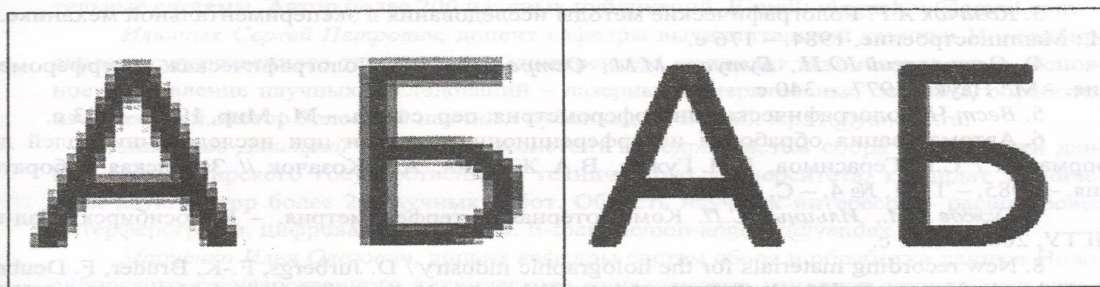


Рис. 5. Кадр с низким разрешением (слева) и синтезированный растр с увеличенным разрешением (справа)

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 высокоразрешающих 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 синтеза 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.
3. 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. Васильков 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 ресурс]. – 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.

1. G. S. Haydukov, V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, R. A. Kuznetsov, A. R. Vagizov // Opt. Eng. 52(12), 3000-3005 (2013)
 2. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 3. V. I. Guzhov // Opt. Eng. 55(12), 124101 (2016)
 4. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, D. S. Haydukov, R. A. Kuznetsov // Opt. Eng. 52(1), 1-6 (2013)
 5. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 6. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, R. A. Kuznetsov, A. R. Vagizov // Opt. Eng. 52(2), 204101 (2013)
 7. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin // Opt. Eng. 52(12), 3000-3005 (2013)
 8. D. D. Bocharov, V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, N. E. Kafidova // Opt. Eng. 44(3), 034101 (2005)
 9. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 10. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 11. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 12. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 13. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 14. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 15. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 16. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 17. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 18. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 19. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)
 20. V. I. Guzhov, S. P. Ilyin, A. G. Ubert // Opt. Eng. 51(1), 1-6 (2012)