

УДК 535.411.854

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ*

В.И. ГУЖОВ¹, С.П. ИЛЬИНЫХ² Д.С. ХАЙДУКОВ³, Е.С. КАБАК⁴

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных. E-mail: vig@edu.nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники. E-mail: ilinyx@corp.nstu.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры систем сбора и обработки данных. E-mail: dmitriyhaydukov@gmail.com.

⁴ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры систем сбора и обработки данных. E-mail: kabak89@gmail.com.

В статье рассмотрены особенности построения цифровых голографических систем реального времени. Произведена оценка технических характеристик предлагаемой цифровой голографической системы. Система позволяет производить запись, восстановление и обработку цифровых голограмм. Особенностью рассмотренной голографической системы является применение графических ускорителей для обработки цифровых голограмм, что позволяет эффективно использовать ее при параллельных вычислениях. Цифровая голографическая система состоит из оптической схемы на основе интерферометра Тваймана-Грина, устройства управления вносимого в опорный фронт сдвига и вычислительного комплекса с графическими ускорителями Nvideo Quadro FX1700. Для обработки цифровых голограмм применена технология Nvideo Cuda 6.5 Toolkit. Работа графических ускорителей производится в конвейерном режиме под управлением надстройки Cuda 6.5 Toolkit. Это позволяет получить быстродействие обработки цифровых голограмм до 30 к/с, что дает возможность реализации измерений в режиме реального времени. Интерференционные картины регистрировались при ручном и автоматическом режимах фотокамеры. Значения выдержки и чувствительности подбирались опытным путем для получения максимального контраста интерференционных картин. Предоставляются широкие возможности для исследования различных объектов оптическими методами с разрешающей способностью, определяемой малой длиной волны

* Статья получена 1 сентября 2014 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту № 14-08-01100. Тема гранта «Цифровая голографическая интерферометрия реального времени для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов».

оптического излучения, характеристиками оптической системы и регистрирующей системы на основе многоэлементных приемников излучения.

Ключевые слова: цифровая интерферометрия, оптическая измерительная система, интерферограмма, оптическая интерферометрия, цифровая голографическая интерферометрия, фазовый сдвиг, интерферометр, программное обеспечение, траектория интерференционных сигналов, метод главных компонент, синтез тестов, экспериментальная проверка

DOI: 10.17212/2307-6879-2014-4-97-112

ВВЕДЕНИЕ

Голографические измерительные системы являются одним из наиболее перспективных инструментов экспериментального исследования деформационных свойств материалов и анализа напряженно-деформированного состояния объектов. Аналоговые варианты технологии нашли достаточно широкое применение в экспериментальной механике в 1970–1990-х гг., их возможности и ограничения подробно исследованы и описаны в литературе [1–5].

Появление в последние годы цифровых голографических систем позволило сделать их значительно более технологичными – устранить необходимость химической обработки фотоматериалов. В цифровой голографии осуществляется компьютерное восстановление объектной волны. При этом метод цифровой голографии обладает уникальным свойством – фаза восстановленной объектной волны может быть рассчитана из одной голограммы [6]. Этот факт обеспечивает принципиально новую возможность – запись практически неограниченной серии одиночных голограмм, соответствующих различным состояниям объекта, и последующее получение (путем их попарного сравнения) зависимости перемещений и деформаций не только от координат, но и от времени. Таким образом, обеспечивается возможность исследования на качественно новом уровне любых процессов деформирования, включая нестационарные квазидинамические и динамические процессы (термическое расширение, текучесть, ползучесть, случайные и затухающие колебания, распространение упругих волн при ударных и взрывных воздействиях и т. д.).

Другими важными преимуществами цифровой голографии являются:

- возможность автоматического определения местоположения узловых линий и знака перемещений;
- возможность корректного измерения сверхмалых перемещений, не приводящих к появлению интерференционных полос;
- возможность компьютерного увеличения и обработки отдельных фрагментов интерферограмм;

– возможность совмещения в одной компьютерной программе измерительных и численных расчетных методов анализа напряженно-деформируемого состояния.

Таким образом, метод цифровой голографической интерферометрии обеспечивает наиболее широкие возможности при анализе напряженно-деформируемого состояния в сравнении с другими оптическими методами.

1. ОПИСАНИЕ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Цифровая голографическая система разработана по схеме Тваймана-Грина (рис. 1 и 2).

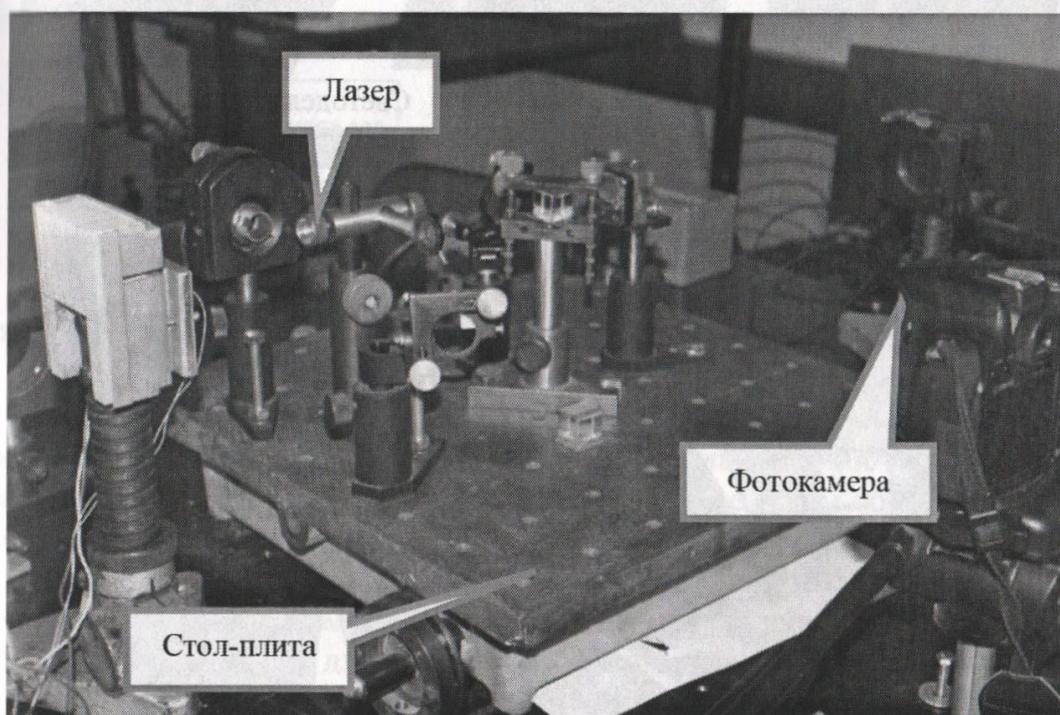
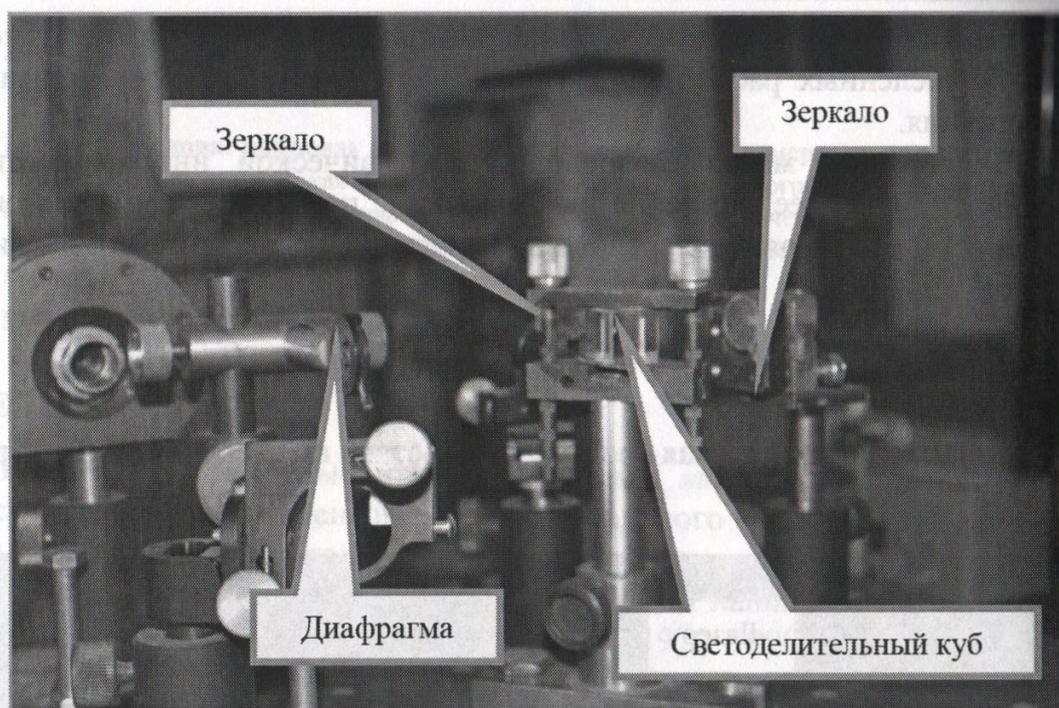
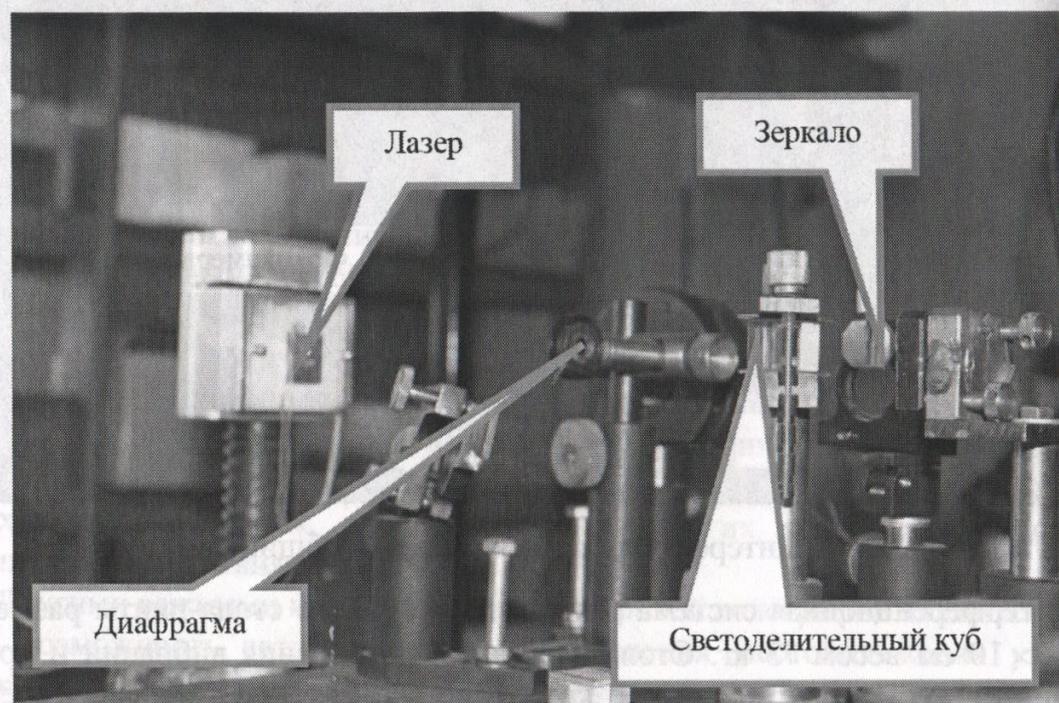


Рис. 1. Интерференционная система (общий вид)

Интерференционная система состоит из чугунного стола-плиты размером $40 \times 40 \times 10$ см весом 73 кг. Стол служит для подавления вибраций и предусматривает жесткое механическое крепление элементов. Стойки для крепления позволяют зафиксировать элементы системы в нужном положении, а также предусматривают юстировку.



а



б

Рис. 2. Цифровая голографическая система:

а – общий вид, б – детально

В качестве источника когерентного излучения используется блок полупроводниковых лазеров RLD65PZB5 с длиной волны 658 и 542 нм и мощностью 5 мВт, стабилизированные по току и температуре. Стабилизация лазера осуществлялась контроллером на базе АТХ-Mega 128.

Для внесения фазового сдвига опорное зеркало было приклеено к пьезокерамическому актюатору пакетного типа П-3 с чувствительностью не менее 1 В/нм и размером 15 × 4,2 мм. Пьезокерамические актюаторы преобразовывают электрические сигналы (напряжения или заряда) в механическое перемещение или силу. Управление таким пьезокерамическим актюатором осуществлялось контроллером на базе АТХ-Mega 128. Общая схема управления показана на рис. 3.

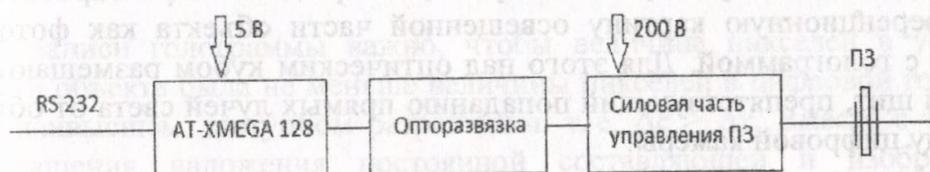


Рис. 3. Схема управления пьезокерамическим актюатором

Расстояние от центра светоделительного куба до опорного и измеряемого зеркала составляет 5 см, т. е. плечи интерферометра равны.

Для регистрации интерференционных картин служит зеркальная фотокамера Canon 500D. Размер матрицы фотокамеры – 22,3 × 14,9 мм (15,5 Мпиксел), максимальное разрешение 4768 × 3174, чувствительность 100-3200 ISO. Фотокамера устанавливалась рядом со столом на штативе таким образом, чтобы интерференционная картина полностью входила на матрицу фотокамеры.

Интерференционные картины регистрировались при ручном и автоматическом режимах фотокамеры. Значения выдержки и чувствительности подбирались опытным путем для получения максимального контраста интерференционных картин.

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Условия проведения экспериментальных измерений в цифровой голографической интерферометрии определяются, с одной стороны, физической возможностью получения корректной цифровой голограммы, с другой стороны, возможностью проведения цифрового голографического восстановления по полученным голограммам.

При формировании цифровой голограммы необходимо, во-первых, обезопасить установку от внешних вибраций, поскольку это препятствует формированию устойчивой интерференции. Для этого могут использоваться антивибрационный стол и звукоизолирующее помещение. Во-вторых, в зоне интерференции влияние постороннего освещения должно быть минимальным, камера должна фиксировать только интерференцию монохроматического когерентного света лазера. Для этого эксперимент должен проводиться без освещения естественными или искусственными источниками света. В-третьих, интенсивность света, отраженного от объекта, должна примерно совпадать с интенсивностью опорного пучка. В противном случае произойдет перекрытие по яркости одного пучка другим, что не позволит корректно сформировать голограмму. В-четвертых, камера должна фиксировать только интерференционную картину освещенной части объекта как фотографию вместе с голограммой. Для этого над оптическим кубом размещают специальный щит, препятствующий попаданию прямых лучей света от объекта на матрицу цифровой камеры.

Цифровое голографическое восстановление может быть корректно выполнено, если будут соблюдены следующие условия. Для формирования внеосевой голограммы необходимо отклонить опорный пучок на определенный угол. Максимальная величина этого угла может быть определена из отношения

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad (1)$$

и составит

$$\theta = 2 \arcsin \frac{\lambda}{2 \Delta x} = 2 \arcsin \frac{0,000628 \text{ мм}}{2 \cdot 0,0043 \text{ мм}} = 8,375^\circ.$$

Возьмем угол отклонения опорного пучка 3° , тогда по формуле (1) $\Delta x = 0,012$ мм. Согласно теореме Найквиста–Котельникова разрешающая способность регистрирующей голограмму среды должна быть минимум в два раза выше, следовательно, разрешающая способность должна быть

$$R \geq \frac{1 \text{ мм}}{2 \cdot 0,012 \text{ мм}} \geq 42 \text{ лин/мм}. \quad (2)$$

При физическом размере матрицы фотоаппарата $22,3 \times 14,9$ мм получим минимально допустимое разрешение 937×626 точек. Таким образом, цифро-

ные голограммы с меньшим разрешением не могут быть корректно восстановлены.

Существуют также ограничения на расстояние записи голограммы при использовании восстановления методом преобразования Френеля. Восстановленное изображение оказывается наиболее четким при совпадении параметров восстановления с параметрами записи голограммы. При восстановлении методом преобразования Френеля восстановленное изображение масштабируется и величина пикселей в восстановленном изображении может быть вычислена при помощи формул

$$\Delta\xi = \frac{\lambda d}{N\Delta x}, \quad \Delta\eta = \frac{\lambda d}{N\Delta y}. \quad (3)$$

При записи голограммы важно, чтобы величина пикселей в условной плоскости объекта была не меньше величины пикселей в цифровой голограмме при наивысшем доступном разрешении, т. е. $\Delta\xi \geq \Delta x$. Вместе с тем, для предотвращения наложения постоянной составляющей и изображения двойника на восстановленное изображение пространственная частота должна минимум в три раза превосходить максимально допустимую

$$|\xi_r - \xi_0| \geq 3\xi_{\max}, \quad (4)$$

тогда из формул (1) и (3) при максимально допустимом разрешении 4096×4096 получим

$$d \geq \frac{3N\Delta x^2}{\lambda} \geq \frac{3 \cdot 4096 \cdot 0,0043^2}{0,000628} \geq 361 \text{ мм}. \quad (5)$$

Данное правило не является жестким требованием, оно лишь обеспечивает получение более качественного восстановления записанной цифровой голограммы методом преобразования Френеля.

Вместе с тем существует расстояние, на котором преобразование Френеля перестает быть справедливым. Это расстояние совпадает с дальней зоной дифракции Франгоуфера. По достижении этого расстояния преобразование Френеля переходит в так называемое преобразование Фурье. Критерием перехода служат выражения

$$\frac{\pi(x^2 + y^2)}{\lambda d} \ll 1, \quad \frac{\pi(\xi^2 + \eta^2)}{\lambda d} \ll 1. \quad (6)$$

Рассматривая это выражение для одномерного случая и минимально допустимого разрешения 937×626 , получим

$$\frac{\pi \cdot \Delta x^2 \cdot (N/2)^2}{\lambda d} \ll \frac{\pi \cdot 0,0043^2 (626/2)^2}{0,000628 \cdot d} \ll \frac{9057 \text{ мм}}{d} \ll 1. \quad (7)$$

Исходя из выражения (7) расстояние записи d должно составлять десятки метров, чтобы преобразование Френеля потеряло справедливость.

Таким образом, разработанная цифровая голографическая система должна удовлетворять вышеописанным ограничениям: угол отклонения опорного пучка возьмем равным 3° , расстояние записи голограммы – 40 см. Для обеспечения наибольшей точности измерений будем формировать цифровые голограммы в разрешении 2048×2048 или 4096×4096 пикселей.

3. ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ОБЪЕКТА

Рассмотрим цифровое голографическое восстановление волнового фронта от реального объекта, которое также входит в процесс цифровой голографической интерферометрии. В качестве объекта записи выберем легко узнаваемую керамическую фигурку, изображенную на рис. 4.



Рис. 4. Реальный объект для записи цифровой голограммы

Поместим данную фигурку на место объекта исследования в измерительной установке и запишем голограмму. Восстановим данную голограмму при помощи метода преобразования Френеля [11]. Результат приведен на рис. 5.

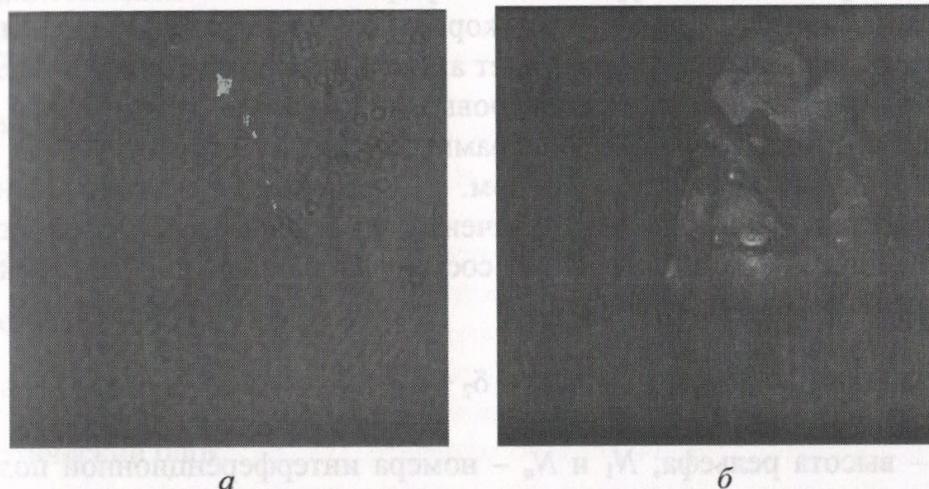


Рис. 5. Восстановление голограммы реального объекта:

а – методом преобразования Френеля; *б* – методом свертки

Из рис. 5 видно, что образ записанной фигурки был восстановлен корректно и достаточно хорошо узнаваем. Это говорит о том, что рассмотренные алгоритмы голографического восстановления работают в реальных условиях.

4. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Основным критерием работы цифровой голографической системы в режиме реального времени является время измерений, которое в основном определяется временем вычисления абсолютной фазы. По различным оценкам, эта величина составляет от нескольких минут до нескольких часов при выполнении расчетов на ЭВМ общего назначения. Используя современную технологию расчетов на ГПУ (графическое процессорное устройство), можно достичь более высокого быстродействия реконструкции и анализа цифровых голограмм. В работе [10] достигнутая скорость обработки цифровых голограмм составила 24 шт/с. Отметим, что при этом производится вычисление только амплитудных характеристик без учета фазы, что существенно ограничивает функциональные характеристики системы (отсутствует информация о глубине рельефа). В случае учета фазы реальная скорость обра-

ботки будет гораздо ниже. В зависимости от размера голограммы скорость вычислений изменяется от десятков секунд до нескольких минут [11]. Если характеристики объекта изменяются во времени достаточно быстро, такой быстродействия может быть недостаточно. Указанный недостаток не преодолен в современных цифровых голографических системах. В настоящее время реализованы только методы скоростной регистрации цифровых голограмм, но не их обработка, что делает актуальными разработку и исследование новых принципов анализа цифровых голограмм. Отметим, что принятый метод анализа цифровых голограмм определяет структуру всей цифровой голографической системы в целом.

Восстановление абсолютного значения объектной фазы можно получить путем решения системы сравнений, состоящей из значений локальных фаз, полученных для разных длин волн:

$$L = N_1\lambda_1 + \delta_1 + \varepsilon_1 = N_2\lambda_2 + \delta_2 + \varepsilon_2 = \dots = N_n\lambda_n + \delta_n + \varepsilon_n. \quad (8)$$

Здесь L – высота рельефа; N_1 и N_n – номера интерференционной полосы на интерферограмме, полученной для первой и n -й длин волн соответственно; λ – длина волны лазера; $\delta_1 = (\lambda_1/2\pi)\phi_1$ и $\delta_n = (\lambda_n/2\pi)\phi_n$ – нормированные значения локальных фаз для первой и n -й длин волн соответственно; ϕ – измеренные значения фаз; ε – погрешность измерения.

Для решения системы сравнений (8) используются разработанные авторами статьи целочисленные алгоритмы, основанные на модулярной алгебре [10].

Для ускорения расчетов в состав цифровой голографической системы входят четыре графических ускорителя NVidia Quadro FX1700 с характеристиками:

тип видеокарты	профессиональная
графический процессор	NVIDIA Quadro FX 1700
интерфейс	PCI-E 16x
кодовое название графического процессора	G84
техпроцесс	80 нм
количество поддерживаемых мониторов	2
максимальное разрешение	2560 × 1600

Технические характеристики:

частота графического процессора	460 МГц
объем видеопамяти	512 Мб
тип видеопамяти	GDDR2
частота видеопамяти	800 МГц
разрядность шины видеопамяти	128 бит
частота RAMDAC	400 МГц

Подключение:

разъемы DVI x2, TV-out

Математический блок:

число универсальных процессоров	32
версия шейдеров	4.0
максимальная степень анизотропной фильтрации	16x
максимальная степень FSAA	16x
поддержка стандартов	DirectX 10.0, OpenGL 3.2

Дополнительные характеристики:

поддержка CUDA есть

Данные для обработки копируются из оперативной памяти в глобальную графическую память, затем в разделяемую память, в которой непосредственно выполняются вычисления. Результаты вычислений из разделяемой памяти копируются опять в глобальную память и из нее возвращаются в оперативную память. Такой порядок вычислений позволяет оптимизировать вычисления за счет большого быстродействия разделяемой памяти в сравнении с другими видами графической памяти [15].

Работа графических ускорителей производится в конвейерном режиме под управлением надстройки Cuda 6.5 Toolkit. Так, например, для реализации преобразования Френеля с помощью БПФ (быстрого преобразования Фурье) использовалась библиотека NVidia-Cufft [16]. Это позволяет получить быстро-

действие обработки цифровых голограмм размером 4096×4096 до 30 к/с, что дает возможность реализации измерений в режиме реального времени [17].

ВЫВОДЫ

Разработанная цифровая голографическая система основывается на фундаментальных принципах когерентной оптики и современных достижениях электронной техники и компьютерных технологий. При этом предоставляются широкие возможности для исследования различных объектов оптическими методами с разрешающей способностью, определяемой малой длиной волны оптического излучения, характеристиками оптической системы и регистрирующей среды на основе многоэлементных приемников излучения. Произведена оценка основных технических характеристик предлагаемой цифровой голографической системы. Система позволяет производить запись, восстановление и обработку цифровых голограмм. Особенностью рассмотренной голографической системы является применение графических ускорителей для обработки цифровых голограмм, что позволяет эффективно использовать разработанные авторами алгоритмы [2], которые позволяют применять технологию параллельных вычислений. Отметим, что существующие алгоритмы обработки цифровых голограмм, как правило, основаны на использовании итерационных процедур, что не позволяет реализовать принципы цифровой голографии в реальном времени на основе традиционных алгоритмов анализа цифровых голограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Digital micromirror transient response influence on superfast 3d shape measurement / Y. Wang, B. Bhattacharya, E.H. Winer, P. Kosmicki, W.H. El-Ratal, S. Zhang // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2014. – Vol. 58. – P. 19–26.
2. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 252 с. – (Учебники НГТУ).
3. Jones R., Wykes C. Holographic and speckle interferometry. – 2nd ed. – Cambridge, UK: Cambridge University, 1989. – Chap. 3. – P. 57.
4. Vest C.M. Holographic interferometry. – New York: John Wiley, 1979.
5. Голографические неразрушающие исследования / ред. Р.К. Эрф; пер. с англ. В.А. Егорова, В.А. Карасева. – М.: Машиностроение, 1979. – 446 с.
6. The experience of pulse holography application for factory environment / V. Gurevich, M. Gusev, I. Begishev, V. Redkorechev // *Proceedings of International Conference on Trends in Optical Non-Destructive Testing*. – Lugano, Switzerland, 1999. – P. 214–221.

7. Schnars U., Jupter W. Direct recording of holograms by CCD-target and numerical reconstruction // *Applied Optics*. – 1994. – Vol. 33, iss. 2. – P. 179–181.
8. Takeda M., Hideki I., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry // *Journal of the Optical Society of America*. – 1982. – Vol. 72, iss. 1. – P. 156–160.
9. Schnars U., Jueptner W. *Digital holography*. – Berlin: Springer Verlag., 2005. – 164 p.
10. Gushov V.I., Solodkin Yu.N. Automatic processing of fringe patterns in in-line interferometers // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1991. – Vol. 14, iss. 4–5. – P. 311–324.
11. Real-time digital holographic microscopy using the graphic processing unit / T. Shimobaba, Y. Sato, J. Miura, M. Takenouchi, T. Ito // *Optics Express*. – 2008. Vol. 16. – P. 11776–11781.
12. Karasev P., Campbell D., Richards M. Obtaining a 35x speedup in 2D phase unwrapping using commodity graphics processors // *IEEE Radar Conference*, 17–20 April 2007. – Boston, Massachusetts, 2007. – P. 574–578. – doi: 10.1109/RADAR.2007.374282.
13. Гужов В.И., Ильиных С.П., Картавых Е.В. Коррекция систематических погрешностей при определении полной фазы в целочисленной интерферометрии // *Автометрия*. – 2008. – Т. 44, № 6. – С. 96–102.
14. Решение проблемы фазовой неоднозначности методом численной интерферометрии / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, А.Р. Вагизов // *Автометрия*. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 85–91.
15. NVIDIA CUDA Programming Guide, version 4.2. – Santa Clara, California: NVIDIA Corporation, 2012. – 175 p.
16. CUDA Toolkit 5.0 CUFFT library: programming guide. – Santa Clara, California: NVIDIA Corporation, 2012. – 33 p.
17. Real-time capture and reconstruction system with multiple GPUs for a 3D live scene by a generation from 4K IP images to 8K holograms / Y. Ichihashi, R. Oi, T. Senoh, K. Yamamoto, T. Kurita // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20. – P. 21645–21655.

Гужов Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследования – оптические измерительные технологии. Имеет более 150 публикаций. E-mail: vig@edu.nstu.ru

Ильиных Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического

университета. Основное направление научных исследований – обработка измерительной информации. Имеет более 100 публикаций. E-mail: ilinykh@corp.nstu.ru

Хайдуков Дмитрий Сергеевич – магистр техники и технологии по специальности «Информатика и вычислительная техника», аспирант кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследования – интерференционные измерительные системы. Имеет 12 публикаций. E-mail: dmitriyhaydukov@gmail.com

Кабак Евгений Семенович – магистр техники и технологии по специальности «Информатика и вычислительная техника», аспирант кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследования – разработка алгоритмов анализа данных. Имеет 3 публикации. E-mail: kabak89@gmail.com

Digital holographic real-time system*

V.I. Guzhov¹, S.P. Ilinykh², D.S. Huidukov³, E.S. Kabak⁴

¹Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation D.Sc. (Eng.), professor department of systems for collecting and processing data. E-mail: vig@edu.nstu.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor of computer science. E-mail: ilinyx@corp.nstu.ru

³Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marks prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, postgraduate student of systems for collecting and processing data. E-mail: dmitriyhaydukov@gmail.com

⁴Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marks prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, postgraduate student of systems for collecting and processing data. E-mail: kabak89@gmail.com

The article describes the design features of digital holographic real-time systems. An assessment of the technical characteristics of the proposed digital holographic system. The system can record, recovery and processing of digital holograms. Especially considering the holographic system is the use of graphics accelerators for processing digital holograms that can effectively use it in parallel computing. Digital holographic optical system consists of a scheme based on the Twyman-Green interferometer, the control unit contributed in supporting the front shift and computer system with graphic accelerators Nvideo Quadro FX1700. For processing digital holograms

* Received 1 September 2014.

The work was carried out with financial support of Russian Foundation for basic research under the grant №14-08-01100. The subject of the grant "Digital holographic interferometry real-time experimental study of stress-strain state of dynamic object known".

der the control of the superstructure Cuda 6.5 Toolkit. This allows the performance of the digital hologram to 30K / sec, which allows the realization of measurements in real time. Interference patterns recorded during manual and automatic modes the camera. The shutter speed and sensitivity were selected empirically to maximize the contrast of the interference patterns. This provides opportunities for the study of various objects by optical methods with a resolution determined by the short wavelength optical radiation characteristics of the optical system and recording system based on multielement radiation.

Keywords: digital interferometry, optical measuring system, the interferogram, optical interferometry, digital holographic interferometry, the phase shift interferometer, the software, tests, experimental verification

REFERENCES

1. Wang Y., Bhattacharya B., Winer E.H., Kosmicki P., El-Ratal W.H., Zhang S. Digital micromirror transient response influence on superfast 3d shape measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, vol. 58, pp. 19–26.
2. Guzhov V.I., Il'inykh S.P. *Komp'yuternaya interferometriya* [Computer interferometry]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 252 p.
3. Jones R., Wykes C. *Holographic and speckle interferometry*. 2nd ed. Cambridge, UK, Cambridge University, 1989, chap. 3, p. 57.
4. Vest C.M. *Holographic interferometry*. New York, John Wiley, 1979.
5. Erf R., ed. *Holographic nondestructive testing*. New York, Academic Press, 1974 (Russ. ed.: *Golograficheskie nerazrushayushchie issledovaniya*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 446 p.).
6. Gurevich V., Gusev M., Begishev I., Redkorechev V. The experience of pulse holography application for factory environment. Proceedings of International Conference on Trends in Optical Non-Destructive Testing, Lugano, Switzerland, 1999, pp. 214–221.
7. Schnars U., Jupter W. Direct recording of holograms by CCD-target and numerical reconstruction. *Applied Optics*. 1994, vol. 33, iss. 2, pp. 179–181.
8. Takeda M., Hideki I., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, vol. 72, iss. 1, pp. 156–160.
9. Schnars U., Jueptner W. *Digital holography*. Berlin, Springer Verlag, 2005. 164 p.
10. Gushov V.I., Solodkin Yu.N. Automatic processing of fringe patterns in integer interferometers. *Optics and Lasers in Engineering*, 1991, vol. 14, iss. 4–5, pp. 311–324.

11. Shimobaba T., Sato Y., Miura J., Takenouchi M., Ito T. Real-time digital holographic microscopy using the graphic processing unit. *Optics Express*, 2008, vol. 16, pp. 11776–11781.
12. Karasev P., Campbell D., Richards M. Obtaining a 35x speedup in 2D phase unwrapping using commodity graphics processors. IEEE Radar Conference, 17–20 April 2007, Boston, Massachusetts, 2007, pp. 574–578. doi: 10.1109/RADAR.2007.374282
13. Guzhov V.I., Il'nykh S.P., Kartavykh E.V. Korrektsiya sistematicheskikh pogreshnostei pri opredelenii polnoi fazy v tselochislennoi interferometrii [Systematic Error Correction in Determining the Total Phase in Integer Interferometry]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2008, vol. 44, iss. 6, pp. 552–556. doi: 10.3103/S8756699008060095
14. Guzhov V.I., Il'nykh S.P., Kuzhetzov R.A., Vagizov A.R. Reshenie problemy fazovoi neodnoznachnosti metodom chislennoi interferometrii [Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2013, vol. 49, iss. 2, pp. 178–183. doi: 10.3103/S8756699013020106
15. NVIDIA CUDA Programming Guide, version 4.2. Santa Clara, California, NVIDIA Corporation, 2012. 175 p.
16. CUDA Toolkit 5.0 CUFFT Library. Programming Guide. Santa Clara, California, NVIDIA Corporation, 2012. 33 p.
17. Ichihashi Y., Oi R., Senoh T., Yamamoto K., Kurita T. Real-time capture and reconstruction system with multiple GPUs for a 3D live scene by a generation from 4K IP images to 8K holograms. *Optics Express*, 2012, vol. 20, pp. 21645–21655.