

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены различные аспекты создания цифровой голографической системы для исследования геометрических параметров динамических объектов. Представлена архитектура системы и алгоритмы восстановления цифровых голограмм, их расшифровки, позволяющие эффективно использовать параллельные вычисления по технологии GPGPU. Это позволяет осуществлять измерения геометрических параметров объектов в режиме реального времени.

Ключевые слова: цифровая голография, голограмма, измерительная система.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 14-08-01100).

Когерентно-оптические методы являются одним из наиболее перспективных инструментов экспериментального исследования деформационных свойств материалов и анализа напряженно-деформированного состояния. Голографические системы рассматривались как наиболее перспективные технологии в экспериментальной механике в 1970–1990 гг., их возможности и ограничения подробно исследованы и описаны в литературе [1–5]. Однако необходимость использования промежуточной голограммы требовала использования фотохимических процессов и существенно сдерживала распространение таких систем. Появление в последние годы цифровых голографических систем, в которых регистрация голограмм осуществляется с использованием матрицы фотоприемников, позволило сделать их значительно более технологичными.

В цифровой голографии осуществляется компьютерная реконструкция объектной волны. При этом метод обладает уникальным свойством — в цифровой голографии фаза восстановленной объектной волны может быть рассчитана по ОДНОЙ ГОЛОГРАММЕ [6]. Этот факт обеспечивает принципиально новую возможность — запись серии одиночных голограмм, соответствующих различным состояниям объекта, и последующее получение (путем их попарного интерферометрического сравнения) зависимости перемещений и деформа-

ций не только от координат, но и от времени. Таким образом обеспечивается возможность исследования на качественно новом уровне любых процессов деформирования, включая *нестационарные* 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 определения информации сразу по всему полю объекта;
- возможность автоматического определения знака перемещений;
- возможность измерения сверхмалых перемещений, не приводящих к появлению интерференционных полос;
- возможность компьютерной обработки отдельных фрагментов голограмм;
- возможность совмещения в одной компьютерной программе измерений поля перемещений и численных методов анализа напряженно-деформируемого состояния.

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

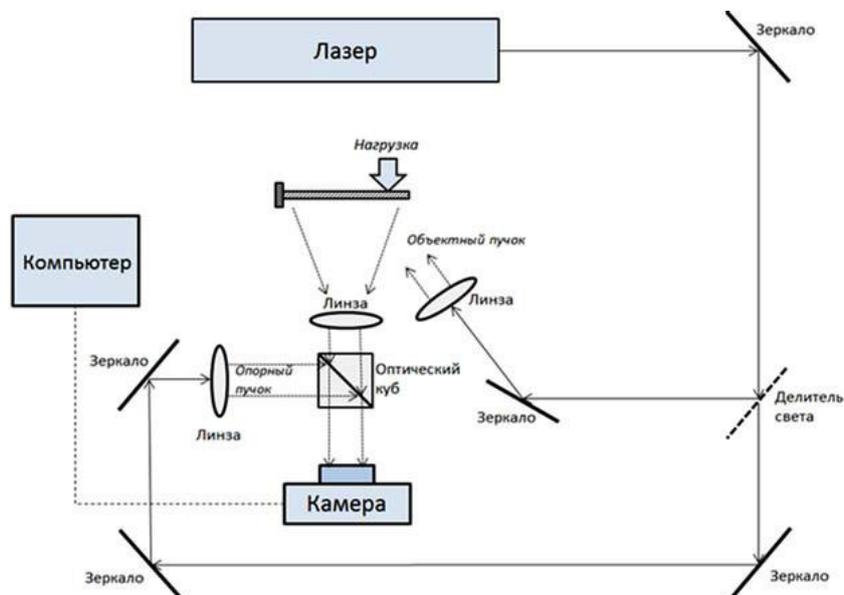


Рис. 1. Оптическая схема цифровой голографической системы

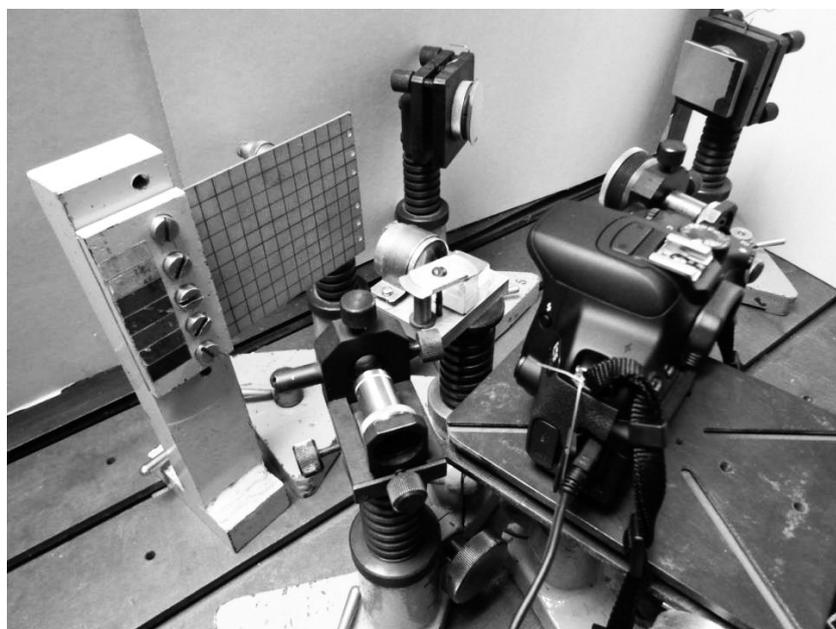


Рис. 2. Внешний вид цифровой голографической системы

На рис. 1, 2 показаны оптическая схема и внешний вид цифровой голографической измерительной системы.

Излучение лазера делится на объектный пучок, освещающий объект и опорный пучок, непосредственно поступающий на приемный сенсор цифровой камеры. Объектный пучок освещает объект в направлении k_1 . Часть света, отраженная объектом в направлении k_2 , называемом «направление наблюдения», проходит через оптическую фокусирующую систему и формирует на приемном сенсоре цифровой видеокамеры изображение объекта. Гол로그램 сфокусированного изображения формируется на матрице цифровой камеры как результат интерференции между опорным и объектным пучками. Диафрагма служит для ограничения пространственных частот возникающей интерференционной структуры и приведения ее в соответствие

с разрешающей способностью приемного сенсора. При этом наложение опорного и объектного пучков на приемной матрицы камеры осуществляется с помощью светоделительного кубика, который устанавливается так, чтобы опорный пучок исходил в направлении сенсора камеры из мнимого источника, расположенного вблизи апертуры.

Пусть $R(x,y)$ — гладкая опорная волна, а $U(x,y)$ — объектная волна, исходящая от объекта. Тогда интенсивность, зарегистрированная на матрице приемной видеокамеры, описывается выражением [7]:

$$I_H(x,y) = |R_H(x,y)|^2 + |U_H(x,y)|^2 + R_H^*(x,y) U_H(x,y) + R_H(x,y) U_H^*(x,y), \quad (1)$$

где H — индекс, обозначающий плоскость голограммы, а индекс $*$ обозначает комплексное сопряжение. Интенсивность, описываемая уравнением (1), регистрируется в виде массива пикселей ($M \times N$),

имеющих размеры $\Delta x \times \Delta y$, что позволяет записать значение интенсивности в виде функции $I_H(m\Delta x, n\Delta y)$, где m и n — целые числа. Последние два члена уравнения (1) содержат информацию об амплитуде и фазе объектной волны. Эта информация может быть выделена с помощью пространственной фильтрации с использованием метода преобразования Фурье [8]. Путем применения преобразования Фурье к зарегистрированному массиву можно выделить и отфильтровать один из двух последних членов уравнения (1). Оба этих члена разделяются в Фурье-плоскости в результате небольшого наклона опорного пучка по отношению к объектному. После фильтрации и обратного преобразования Фурье мы получаем комплексную амплитуду объектного волнового фронта. Из полученной в цифровом виде комплексной амплитуды $U_H(m\Delta x, n\Delta y)$ может быть рассчитана локальная фаза ϕ_{Hw} волнового фронта объектной волны в диапазоне $0=2\pi$ по следующим соотношениям:

$$Sy = \text{Im}[U_H(m\Delta x, n\Delta y)], \quad Sx = \text{Re}[U_H(m\Delta x, n\Delta y)] \\ \text{и } \phi_{Hw}(m\Delta x, n\Delta y) = \arctg(Sy/Sx) \quad (2a)$$

$$\phi_{Hw} = \arctg(Sy/Sx), \quad (2b)$$

где Re и Im обозначают действительную и мнимую часть комплексного числа соответственно.

Абсолютное значение полной фазы ϕ определяется с учетом номера интерференционной полосы N .

$$\phi = \phi_{Hw} + 2\pi N. \quad (3)$$

Путем вычитания значений фаз объектного поля, рассчитанных для двух состояний объекта (например, до приложения нагрузки и после), можно получить значение абсолютной разности фаз, которая позволяет рассчитать смещение точек объекта d в результате приложения нагрузки в направлении s по формуле:

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda)d \cdot s, \quad (4)$$

где λ — длина волны излучения лазера, s — вектор чувствительности интерферометра, определяемый выражением $s = k_i - k_v$, где k_i и k_v — единичные векторы освещения и наблюдения соответственно.

Для измерения полного вектора перемещений используется схема с тремя различными векторами чувствительности, что позволяет получить три линейно-независимых уравнения вида (4) и рассчитать проекции полного вектора на оси координат [9].

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/сек. 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 обработки будет гораздо ниже. В зависимости от размера голограммы время вычислений составляет от десятков секунд до нескольких минут [11]. Если характеристики динамического объекта изменяются во времени достаточно быстро, то такой производительности вычислений может быть недостаточно для обеспечения измерений в режиме реального времени.

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. Указанный недостаток не преодолен в современных, как отечественных, так и зарубежных цифровых голографических системах. В настоящее время реализованы только методы скоростной регистрации цифровых голограмм, но не их обработка, что делает актуальной разработку и исследование новых принципов анализа цифровых голограмм.

Авторами предложены новые методы [1, 12, 13], основанные на применении принципов модульной арифметики, позволяющие устранить данное ограничение. Эти методы основаны на сравнительно новом разделе вычислительной математики — теории безошибочных вычислений [14]. Другой эквивалент этого термина — точные вычисления (exact computation). Теория безошибочных вычислений имеет дело с задачами, для которых входная информация представима набором целых чисел или многочленов с целыми коэффициентами. Основой ее является модульная или модулярная арифметика [14]. Интерес к таким алгоритмам вызван внутренним параллелизмом многомодулярной арифметики и появлением сверхмощных компьютеров, технологий использования графических процессоров для выполнения расчетов общего назначения. Целочисленные алгоритмы требуют безошибочных исходных данных, что невозможно при решении прикладных задач. Поэтому основное внимание авторы уделяют построению устойчивых параллельных алгоритмов. Авторскому коллективу в последние годы удалось существенно продвинуться в решении этой проблемы. Основой для использования целочисленных алгоритмов при анализе исходных данных, полученных с заданным уровнем погрешности, является анализ окрестности грубых промахов, образующейся при решении системы сравнений. Разработаны алгоритмы устранения фазовой неоднозначности образующейся при анализе цифровых голограмм. Однако использование разработанных алгоритмов сдерживается большим объемом вычислительных операций. Требуются дополнительные исследования с целью построения эффективных вычислительных схем, позволяющих существенно сократить число операций.

На основе предлагаемых в статье подходов разработана цифровая голографическая система реального времени для исследования динамических объектов. Это достигнуто путем модернизации цифровой голографической системы, таким образом, чтобы можно было получать голограммы с разными длинами волн. Для этой цели лазер имеет возможность перестройки длины волны. Тогда восстановление абсолютного значения объектной фазы можно получить путем решения системы сравнений, состоящей из значений локальных фаз, полученных для разных длин волн.

$$L = N_1\lambda_1 + \delta_1 + \varepsilon_1 = N_2\lambda_2 + \delta_2 + \varepsilon_2 = \dots = N_n\lambda_n + \delta_n + \varepsilon_n \quad (5)$$

здесь L — высота рельефа, N_1 и N_n — номер интерференционной полосы на интерферограмме, полученной для первой и n -ой длин волн соответственно, λ — длина волны лазера, ϕ — измеренные значения фаз, $\delta_1 = (\lambda_1/2\pi)\phi_1$ и $\delta_n = (\lambda_n/2\pi)\phi_n$ — нормированные значения локальных фаз для первой и n -ой длин

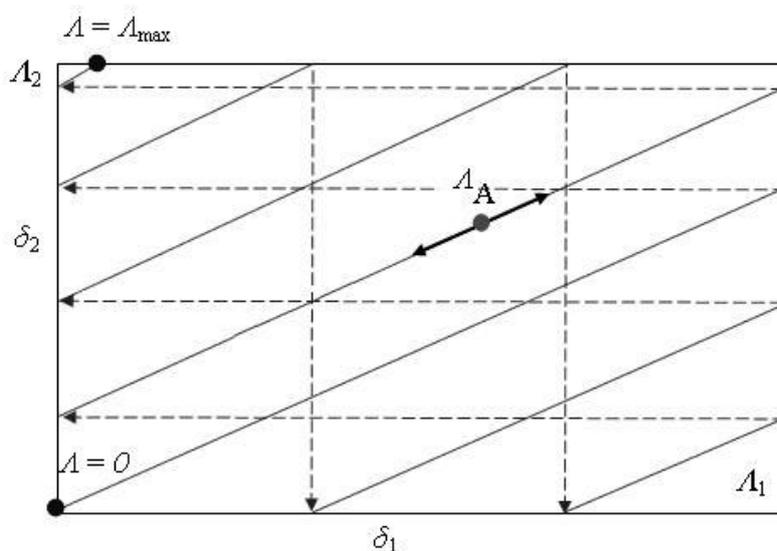


Рис. 3. Таблица решений системы сравнений (5) для двух длин волн

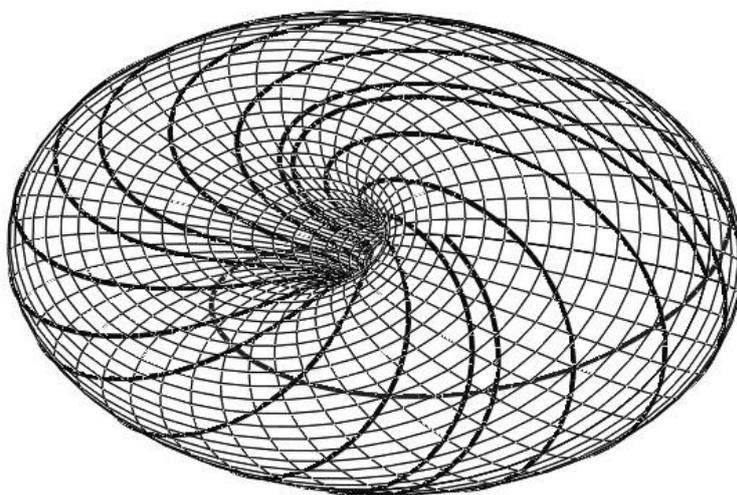


Рис. 4. Отображение таблицы решений в виде тора

волн соответственно, ε — погрешность измерения. Для решения системы сравнений (5) используются разработанные авторами целочисленные алгоритмы, основанные на модулярной алгебре [12, 13]. Реализация данных алгоритмов требует применения быстродействующих вычислительных средств, использующих параллелизм модулярной алгебры. Основой построения модулярных алгоритмов является свертка многомерной таблицы решений системы сравнений (5) в тор.

На рис. 3 показан двумерный случай таблицы возможных решений сравнений (5) для двух длин волн. Здесь объектная фаза изменяется от 0 до Λ_{\max} . Из рисунка следует, что одной из возможных значений высоты рельефа (точка Λ_A) соответствует одна комбинация двух функционально связанных локальных фаз, т.е. $\Lambda_A = f(\delta_1, \delta_2)$. В многомерном случае имеем набор двумерных таблиц (проекций) для различных сочетаний длин волн. Путем «склеивания» таблиц по вертикали и горизонтали получаем многомерный тор. Таким образом, абсолютное значение фазы будет однозначно определяться по-

ложением точки на поверхности тора. На рис. 4 показан двумерный тор, соответствующий свертке таблицы решений системы сравнений, показанной на рис. 3.

Отметим, что данный алгоритм инвариантен к профилю фазовой картины и не требует трудоемкого анализа фазовых переходов, как в классических методах разворачивания фазы [1], и позволяет получить абсолютное значение фазы непосредственно по локальным значениям фаз, полученных с разными длинами волн [1, 12, 13]. Это позволяет повысить скорость анализа цифровых голограмм на один — два порядка и в итоге решить основную задачу — реализовать цифровую голографическую систему, работающую в режиме реального времени для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов.

Предлагаемые методы анализа измерительной информации могут быть использованы в высокоскоростных методах измерений разности фаз объектного и предметного волновых фронтов при различных диапазонах длин волн (оптических,

акустических, методах радиоголографии и т.д.), а разработанные быстродействующие вычислительные алгоритмы на основе многомодулярной алгебры пригодны для решения широкого класса прикладных задач.

Библиографический список

1. Гужов, В. И. Компьютерная интерферометрия / В. И. Гужов, С. П. Ильиных. — Новосибирск : НГТУ, 2004. — 252 с.
2. R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, 2nd ed., Cambridge University, Cambridge, UK, 1989, Chap. 3.
3. Вест, Ч. Голографическая интерферометрия / Ч. Вест ; пер. с англ. — М. : Мир, 1982. — 504 с.
4. Голографические неразрушающие испытания / Под ред. Р. К. Эрфа ; пер. с англ. — М. : Машиностроение, 1979. — 448 с.
5. Gurevich V., Gusev M., Begishev I., Redkorechev V. The experience of pulse holography application for factory environment // Proc. of Int. Conf. On Trends In Optical NDT, Lugano, Switzerland, 1999. — P. 214–221.
6. Schnars U., Jupter W., Direct recording of holograms by CCD-target and numerical reconstruction. *Applied Optics*, 33(2) : 179–181, 1994.
7. M. Takeda, Hideki, and S. Kobayashi, Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982.
8. U. Schnars, W. Jueptner, *Digital holography*, Springer Verlag., 2005.
9. Балтийский, С. А. Современные методы цифровой голографии / С. А. Балтийский, И. П. Гуров, С. Де Никола, Д. Коппола, П. Ферраро // Проблемы когерентной и нелинейной оптики ; под ред. И. П. Гурова, С. А. Козлова. — СПб. : СПбГУ ИТМО, 2004. — С. 91–117.

10. Shimobaba T, Sato Y, Miura J, Takenouchi M, Ito T. Real-time digital holographic microscopy using the graphic processing unit. *Opt. Express*. 2008 ;16 ; 11776–11781.

11. P. Karasev, D. Campbell, and M. Richards. Obtaining a 35x Speedup in 2D Phase Unwrapping Using Commodity Graphics Processors. *Radar Conference, 2007 IEEE*, pages 574–578, April 2007.

12. Гужов, В. И. Коррекция систематических погрешностей при определении полной фазы в целочисленной интерферометрии / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Е. В. Картавых // Автометрия. — 2008. — Т. 44. — № 6. — С. 56–60.

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

14. Грегори, Р., Кришнамурти Е. Безошибочные вычисления. Методы и приложения / Р. Грегори, Е. Кришнамурти ; пер. с англ. — М. : Мир, 1988. — 208 с.

ГУЖОВ Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).
ИЛЬИНЫХ Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры вычислительной техники НГТУ.

КУЗНЕЦОВ Роман Александрович, кандидат технических наук, старший инженер-программист ООО «Алавар.Ру», г. Москва.

КАБАК Евгений Семёнович, аспирант кафедры систем сбора и обработки данных НГТУ.

Адрес для переписки: isr51@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.10.2014 г.

© В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Р. А. Кузнецов, Е. С. Кабак

Книжная полка

Латыев, С. Конструирование точных (оптических) приборов : учеб. пособие / С. Латыев. — 2-е изд., испр. и доп. — СПб. : Лань, 2015. — 560 с. — ISBN 9785-8114-1734-6.

Учебное пособие посвящено основам конструирования современных точных приборов, типичными представителями которых являются оптические приборы, содержащие в своем составе механические, электронные и оптические функциональные устройства и элементы. Специфика конструирования таких приборов заключается в том, что их показатели качества и в первую очередь показатели точности, технологичности и надежности в существенной степени зависят от выполнения определенных методов, правил и принципов конструирования, способов и методов параметрического и точностного синтеза конструкций, знаний путей и приемов повышения целевых показателей качества при проектировании. Книга состоит из четырех частей. В первой части рассматриваются методы, общие правила и принципы конструирования точных приборов и их элементов. Во второй излагаются основы теории точности и понятия надежности приборов. Третья часть посвящена современным методам повышения качества приборов при проектировании, включая алгоритмическую (цифровую) коррекцию погрешностей. В четвертой части приводятся типовые конструкции сборочных единиц и элементов точных приборов, рассматриваются способы их юстировки и контроля. Учебное пособие предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений приборостроительного профиля, а также инженерно-технических работников промышленности.

Каплан, Б. Ю. Приборостроение. Введение в специальность : учеб. пособие (соответствует ФГОС 3-го поколения) / Б. Ю. Каплан. — М. : ИНФРА-М, 2014. — 112 с. — ISBN 978-5-16-006719-3.

В пособии дается объяснение областей деятельности, относящихся к приборостроению, показаны познавательная сущность измерений, их значение в развитии науки и техники. Рассмотрена система единиц СИ, даются начальные сведения об их методологических свойствах и характеристиках, о методах оценки погрешностей средств измерения.