

ЗАПИСЬ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ МИКРОННЫХ ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

В. Г. Каменев, М. Е. Дворниченко

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

Введение

Описывается метод восстановления цифровых голограмм, позволяющий существенно сократить время обработки. Процесс восстановления цифровой голограммы выполняется численно при помощи виртуальной опорной волны, которая вычисляется математически и по характеристикам совпадает с реальной опорной волной, использованной при записи. Восстановленное изображение формируется из суммарного волнового фронта в плоскости восстановления, и представляет собой суперпозицию всех точечных источников, которая описывается интегралом Френеля–Кирхгофа. Прямой расчет интеграла занимает значительное машинное время, поэтому для ускорения расчета голограмм используется метод свертки.

В работе при помощи данного метода восстанавливается распределение микронных частиц в пространстве при различных расстояниях от исследуемого объема до камеры, анализируется точность восстановления.

Методы восстановления голограмм

При регистрации процессов пыления с помощью цифровой оптической голографии чаще всего используется схема фраунгоферовской in-line голографии. На рис. 1 показано отличие данной схемы от классической голографии.

В классической голографии голограмма представляет собой микроскопические полосы, работающие по принципу дифракционной решетки и содержат паразитные максимумы дифракции, накладывающиеся на основное изображение. Во втором случае микроструктура голограммы состоит из систем концентрических колец, которые формируются каждой частицей отдельно. Такая голограмма работает по принципу зонных пластинок Френеля, и не имеет паразитных максимумов.

Метод оптической голографии основан на регистрации голографических изображений движущихся частиц и восстановлении их изображений с помощью цифровой обработки голограммы путем расчета

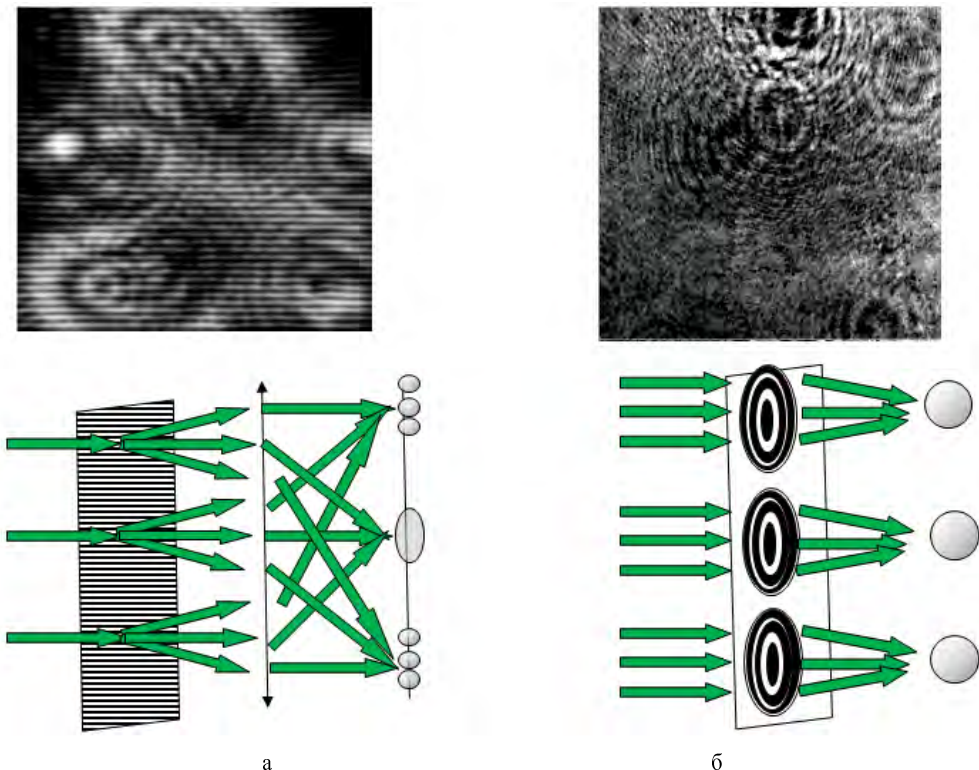


Рис. 1. Отличие фраунгоферовской голографии от классической голографии: а – классическая голография; б – регистрация процессов пыления по схеме фраунгоферовской in-line голографии

интеграла Френеля–Кирхгофа. Основной проблемой при обработке цифровых голограмм является значительное время расчета интеграла. Поэтому широко используются и разрабатываются методы, позволяющие оптимизировать процесс обработки данных.

Для восстановления цифровой голограммы требуется, чтобы процесс распространения опорной волны, ее дифракция на голограмме и формирование восстановленного волнового фронта были смоделированы математически. Согласно принципу Гюйгенса каждая точка голограммы служит источником вторичных гармонических сферических волн, описываемых формулой:

$$U(r, t) = \frac{A}{r} \exp(i\omega t - ikr), \quad (1)$$

где r – расстояние от источника до исследуемой точки; $\frac{A}{r}$ – убывающая амплитуда колебаний; ω – круговая частота; i – мнимая единица; k – волновое число.

Восстановленное изображение формируется из суммарного волнового фронта в плоскости восстановления, и представляет собой суперпозицию всех точечных источников сферических волн, распространяющихся от голограммы. Такая суперпозиция описывается интегралом Френеля–Кирхгофа, который можно записать в виде:

$$U_{obj}(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{\infty} U_h(x, y) q(x_1 - x, y_1 - y) dx dy, \quad (2)$$

где $q(x_1 - x, y_1 - y) = \frac{ia_r}{\lambda} \frac{\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \rho(x, y, x_1, y_1)\right)}{\rho(x, y, x_1, y_1)}$,

причем $g(x_1 - x, y_1 - y) = g(x - x_1, y - y_1)$, т. е. данная функция – четная.

Данный интеграл может быть интерпретирован, как интеграл свертки или интеграл взаимной корреляции, которые в данном случае не различаются по причине четности функции $g(x_1 - x, y_1 - y)$. Следовательно, расчет интеграла Френеля–Кирхгофа методом свертки для заданного расстояния d в данном случае равносильен расчету функции взаимной корреляции между изображением голограммы и рассчитанным для данного значения d изображением функции $g(x_1 - x, y_1 - y)$. Функция взаимной корреляции двух относительно быстро рассчитывается поточечным перемножением их Фурье-образов с последующим обратным преобразованием Фурье.

Результаты

На рис. 2 показана схема голографической регистрации параметров дисперсной фазы. Излучение лазера 6 коллимируется телескопом 5 и направляется в объектив 4. В перетяжке между объективами 4 и 2

расположен исследуемый объект 3. Голограммы регистрируются на камере 1.

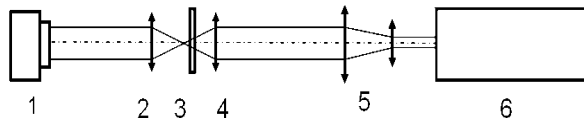


Рис. 2. Схема голографической регистрации параметров дисперсной фазы: 1 – регистрирующее устройство; 2 – микрообъектив; 3 – образец; 4 – микрообъектив; 5 – коллимирующая оптика; 6 – лазер

На рис. 3 показаны результаты вычисления функции $g(x_1 - x, y_1 - y)$ при различных расстояниях от фокальной плоскости. Данная функция соответствует дифракции параллельного пучка на точечном объекте. С увеличением расстояния растет диаметр колец и их количество.

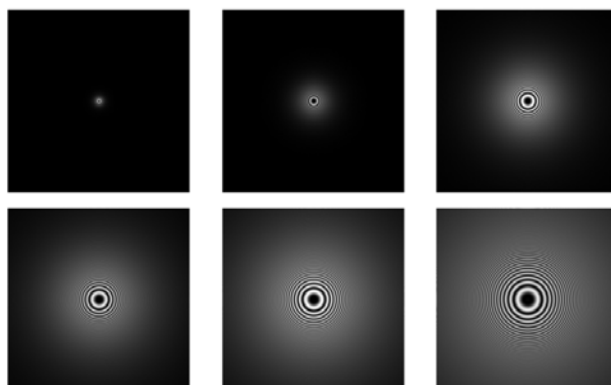


Рис. 3. Результаты вычисления функции $g(x_1 - x, y_1 - y)$ при различных расстояниях от фокальной плоскости

На рис. 4 показаны исходные голограммы и результаты восстановления голограмм с помощью предложенного алгоритма.

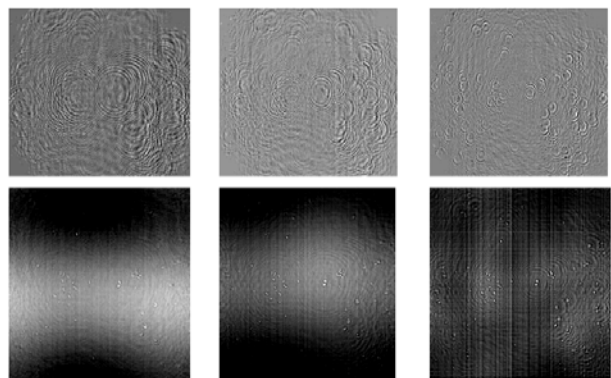


Рис. 4. Исходные голограммы и результаты восстановления голограмм с помощью предложенного алгоритма

На рис. 5 показаны голограмма и результаты восстановления протяженного объекта – проволоки диаметром 50 мкм с нанесенными на нее частицами пыли.

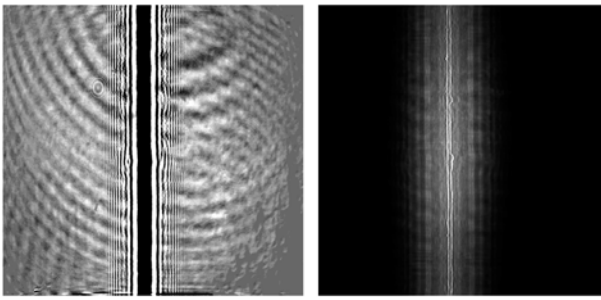


Рис. 5. Голограмма и результаты восстановления протяженного объекта

Предложенный метод позволяет производить высококачественный расчет цифровых голограмм с очень малыми затратами машинного времени. Если восстановление цифровой голограммы 1024×1024 пикселя с помощью прямого вычисления интеграла Френеля-Кирхгофа занимает несколько часов машинного времени, то расчет по предложенному методу занимает несколько секунд. При этом первоначально тратится несколько часов машинного времени для расчета функции $g(x_1 - x, y_1 - y)$ при различных расстояниях.

Выводы

1. Разработан метод быстрого восстановления изображений из цифровых голограмм, позволяющий получить трехмерное распределение объектов в пространстве на основе интерференционной картины рассеянного на них излучения.
2. Цифровая фраунгоферовская голография позволяет регистрировать частицы микронных размеров с высоким разрешением и на порядок превосходит по глубине резко изображаемого пространства цифровую фотографию.

Литература

1. Кузнецов Р. А. Разработка системы неразрушающего контроля на основе методов цифровой голографической интерферометрии, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Новосибирск, 2013
2. Sorenson D. S., Pazuchanics P., Johnson R., et al. Ejecta Particle-Size Measurements in Vacuum and Helium Gas using Ultraviolet In-Line Fraunhofer Holography // LA-UR-14-24722 2014-06-25
3. Корешев С. Н. Основы голографии и голографической оптики» // СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.