УДК 535:778.38:004.932

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ ЧАСТИЦ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

В. В. Дёмин *, Д. В. Каменев

Томский госуниверситет, г. Томск, Россия

В работе рассмотрено голографическое исследование частиц. Основное внимание уделено извлечению информации из цифровой голограммы, а именно определению характеристик частицы по её голографическому изображению. Для оценки эффективности этого этапа использованы количественные критерии качества голографического изображения. Эти критерии использованы и для определения положения частицы в пространстве, что обеспечивает существенно более высокую точность (погрешность порядка 0,2 мм) по сравнению с другими методами. Разработан алгоритм повышения качества голографического изображения частицы. Обсуждается методика двумерного отображения голографического изображения объёма среды с частицами, позволяющая автоматизировать извлечение информации из цифровой голограммы частиц.

ВВЕДЕНИЕ

Голографическое исследование частиц используется при изучении процессов в лабораторных и естественных аэрозольных средах (туманы, осадки, облака) [1, 2] и взаимодействия лазерного излучения с аэрозольной средой [3], для диагностики двухфазных потоков, при изучении технологических дисперсных сред и процессов (горение, распыление в форсунках, впрыск топлива и т. п.), для анализа свойств частиц в биологии и медицине, включая подводную голографию планктона [4–6]. Эффективность голографии обусловлена возможностью обеспечить одновременно большу́ю глубину регистрируемого объёма среды, содержащей исследуемые частицы, и высокое разрешение деталей каждой частицы, что принципиально не достигается другими методами. При этом обеспечивается также определение размеров, формы, координат и параметров движения каждой частицы, содержавшейся в объёме среды на этапе регистрации. Цифровая голография добавляет к этому дополнительные возможности: передачу голограммы по каналам связи и исследование динамики частиц путём формирования видео на основе временны́х последовательностей цифровых голограмм [6].

Процесс голографического исследования частиц можно разбить на четыре основных этапа.

Первым этапом является запись голограммы, т. е. максимально неискажённая регистрация картины интерференции излучения, рассеянного на частицах (предметной волны) и прошедшего без рассеяния (опорной волны). В силу ограниченности разрешения ПЗС-камер во всех экспериментах данной работы применялась осевая схема. Полученная голограмма представляет собой дискретный двумерный массив значений интенсивностей в плоскости регистрации, квантованный регистрирующей камерой по уровням серого.

На втором этапе голографическое изображение каждой частицы восстанавливается с качеством, достаточным для дальнейших измерений. В случае цифровой голограммы послойное восстановление изображения объёма с частицами проводится численно путём расчёта дифракционного интеграла для заданных расстояний от плоскости голограммы до текущего слоя (плоскости сечения) восстановленного объёмного изображения.

^{*} dyomin@mail.tsu.ru

На третьем этапе определяются геометрические параметры каждой частицы объёма (размер, форма, координаты, ориентация) с максимальной точностью, в некоторых исследованиях выполняется определение параметров движения, построение траектории. И наконец, на четвёртом этапе строятся усреднённые характеристики частиц объёма — распределения частиц по размерам, формам, координатам расположения, ориентациям, направлениям движения.

Этапы записи и восстановления голографического изображения достаточно хорошо описаны в литературе, и в данной работе обсуждены лишь основные особенности и необходимые условия их реализации. Оценке, обработке и представлению извлекаемой из цифровой голограммы информации о частицах в литературе уделено не так много внимания. Кроме этого, многие результаты базируются на визуальных оценках восстановленных изображений частиц. Вместе с тем восстановление из цифровой голограммы изображения частицы с хорошим качеством (с количественными критериями оценки качества) и извлечение из неё нужной информации — это достаточно сложная задача, требующая специальных вычислительных методов и ресурсов, особенно для большого количества частиц в исследуемом объёме. Именно этим вопросам посвящена основная часть данной работы. Обсуждаются улучшение качества путём обработки восстановленных голографических изображений, извлечение информации о координатах частицы, усреднение и представление информации с возможностью автоматизации этого процесса. При этом не рассматривались процедуры определения размеров, площади сечения и параметров формы частиц по их цифровым голографическим изображениям, поскольку они достаточно очевидны. В то же время остальные процедуры построены с использованием единых количественных критериев оценки качества голографического изображения.

1. ЗАПИСЬ ГОЛОГРАММЫ ЧАСТИЦЫ

1.1. Регистрация неискажённой картины интерференции предметной и опорной волн

Для записи голограммы необходимо выполнить ряд условий, обеспечивающих регистрацию неискажённой (или минимально искажённой) картины интерференции предметной и опорной волн. При регистрации цифровой голограммы эти условия, в основном, связаны с характеристиками используемой камеры на основе матрицы — прибора с зарядовой связью (ПЗС-камеры): размер пиксела, размер матрицы, разрядность, диапазон экспозиций. Оценки требований, которые должны быть выполнены при регистрации голограммы частицы, проводились неоднократно [5– 9]. Например, в случае регистрации осевой голограммы сферической частицы в зоне дифракции Фраунгофера, картина интерференции опорной и предметной волн представляет собой картину Эйри, модулированную синусоидой согласно [7]. Если предположить, как это сделано в ряде работ, что для неискажённой регистрации информации о форме частицы необходимо зарегистрировать центральный и три боковых максимума картины Эйри, то легко оценить [7] радиус голограммы одиночной частицы (он определяет требуемую полуширину ПЗС-матрицы), а также период интерференционной картины на краю голограммы частицы (он определяет требуемый размер пиксела ПЗС-матрицы).

Конструктивные особенности схемы для регистрации частиц должны учитывать скорость их перемещения, поскольку при использовании непрерывных источников излучения и больши́х скоростях движения частиц регистрируемая интерференционная картина может получиться размытой, что, несомненно, снизит качество восстановленного изображения. Поэтому в работе [5] предложено допустимой считать такую скорость частицы, при которой за время экспозиции картина интерференции предметной и опорной волн сместится на одну десятую часть своего мини-



Рис. 1. Зависимость качества голографического изображения планктонной частицы от размера пиксела ПЗС-матрицы, регистрирующей голограмму: 7,4 мкм на панели *a*, 14,8 мкм на панели *b*, 22,2 мкм на панели *b*, 29,6 мкм на панели *c*

мального периода.

В работе [10] нами показано, что в конкретных условиях записи цифровых голограмм частиц необходим предварительный численный эксперимент по определению требуемых пространственных параметров ПЗС-матрицы. Возможные последствия неправильного выбора размера пиксела проиллюстрированы на рис. 1. Здесь представлены изображения планктонной частицы, восстановленные с одной и той же голограммы при увеличении размера пиксела (размер увеличивался объединением соседних пикселов в группы по 2×2 , 3×3 и 4×4 пиксела), значения соответствующих интенсивностей усреднялись. Видно, что для голографирования данной частицы размер пиксела должен быть не более 14,8 мкм.

В работе [10] также проведены численные эксперименты по голографированию непрозрачных плоских модельных частиц правильных форм (круг, треугольник, квадрат, шестиугольник и т. д.), и показано, что для получения восстановленного голографического изображения приемлемого качества достаточно зарегистрировать на голограмме центральный максимум и 1,0÷1,5 боковых дифракционных максимумов, в зависимости от формы частицы. Эксперименты также показали целесообразность использования для регистрации цифровых голограмм частиц ПЗСкамеры с разрядностью не ниже 10.

На качество получаемого голографического изображения также влияет и концентрация частиц, содержащихся в объёме. В работах [8, 9] проведены оценки допустимой прозрачности среды с частицами и получено, что она должна быть не меньше 80 %. Отметим, что в этом случае можно считать голограмму большого количества частиц набором одиночных голограмм каждой частицы. Поэтому в голографии частиц обычно рассматриваются особенности регистрации одной частицы, и затем они распространяются на ансамбль частиц.

Конкретные условия также налагает решаемая задача, тип частиц и среда, в которой находятся исследуемые частицы. Наиболее сложной представляется голографическая регистрация планктонных частиц в естественных условиях, которую осуществляют при помощи погружаемых голографических камер. Сложности в этом процессе связаны с преломлением на границе раздела сред (вода—иллюминатор камеры—воздух), с наличием турбулентных возмущений регистрируемого объёма, с близостью величины показателя преломления воды и некоторых планктонных частиц и т. п. Тем не менее, существующие погружаемые цифровые голографические камеры, которые описаны в ряде публикаций (см., например, [4–6, 9, 11–15]), обеспечивают регистрацию планктонных частиц с разрешением от нескольких микрометров и выше, а продольный размер регистрируемого объёма (глубина сцены) — 500÷700 мм. Поскольку данная статья посвящена, в основном, извлечению информации из цифровых голограмм частиц, не будем останавливаться на особенностях этих камер. Отметим лишь, что экспериментальный материал, используемый в

данной статье, получен частично при лабораторных экспериментах с зоопланктоном, частично в экспедиционных условиях на озере Байкал в 2007–2008 годах [5] и на Чёрном море в 2012 году [13].

1.2. Критерии качества восстановленного изображения

Выбор соответствующей камеры связан с параметрами регистрируемой картины интерференции предметной и опорной волн и обоснован в ряде публикаций [5, 6, 10]; подтверждением его правильности предлагается считать качество восстановленного изображения. При этом под приемлемым качеством голографического изображения частицы обычно понимают возможность определения формы и размеров с заданной погрешностью и чаще всего оценивают его визуально (субъективно). Наиболее распространённые объективные критерии качества построены на сравнении изображения с эталоном, что неприемлемо при изучении частиц в естественных условиях (планктон, аэрозоли, облачные частицы).

В работах [16, 17] для оценки качества изображения предложены количественные критерии граничный контраст и граничный перепад. Для их вычисления вдоль границы голографического изображения частицы выделяются внутренняя и внешняя области заданной ширины и рассчитывается средняя интенсивность в каждой из областей. Граничный контраст определяется как отношение полученных средних интенсивностей, а граничный перепад — как их разность, нормированная на максимальную возможную интенсивность в изображении. Очевидно, что эти критерии должны характеризовать чёткость границы изображения частицы, следовательно, ширина выделяемых областей должна быть много меньше размера частицы. В работах [16–18] исследованы устойчивость и чувствительность граничного контраста и граничного перепада к размытию границы, наличию шума, ошибкам определения положения границы частицы, при этом показана целесообразность совместного использования граничного контраста и граничного перепада для обоснования выбора тех или иных параметров ПЗС-камеры.

Для того, чтобы количественно оценить соответствие качества голографических изображений и возможности дальнейшей идентификации частиц и определения их размеров с заданной точностью, в работе [18] была проведена серия экспериментов по определению соответствующих предельных (требуемых) значений граничного контраста и граничного перепада.

В этих экспериментах моделировалось и реализовывалось голографирование непрозрачных модельных плоских частиц различных правильных форм с одинаковой площадью 40 000 мкм². Граничный контраст и граничный перепад определялись для фиксированной ширины внешней и внутренней областей 14,8 мкм, что соответствует 2 пикселам ПЗС-камеры «Видеоскан 2020» и не противоречит условию, согласно которому ширина должна быть много меньше размеров частицы. Считалось, что голографическое изображение частицы имело приемлемое качество, если искажение формы изображения по сравнению с оригиналом составляло не более 5 %. Под искажением формы понималось одновременное отличие длины границы и площади голографического изображения частицы и оригинала не более чем на 5 %.

В результате установлено, что требуемые граничный контраст и граничный перепад равны 2,5 и 0,45 соответственно для изображений частиц, восстановленных из рассчитанных голограмм частиц различной формы, и 2,0 и 0,25 для изображений частиц, восстановленных из экспериментально зарегистрированных голограмм. Эти значения получены для частиц различных форм с характерным размером порядка 200 мкм (исходя из вышеуказанной площади их сечения), поэтому в дальнейшем они используются для оценки качества голографических изображений частиц с размером такого порядка величины. Отметим также, что требуемые значения граничного контраста и граничного перепада существенно зависят от ширины выделенных внутренней и внешней областей, поэтому далее их ширина задаётся равной стороне двух пикселов ПЗС-камеры «Видео-

скан 2020», так же, как в вышеописанных экспериментах.

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ И ПОВЫШЕНИЕ ЕГО КАЧЕСТВА ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Объективная измеряемая оценка (характеристика) качества голографического изображения частицы необходима на этапе восстановления и для других целей. Например, по ряду причин восстановленные из голограммы изображения частиц могут быть низкоконтрастными, с помехами и шумами. Такие изображения характерны, в частности, для голографической регистрации планктона в воде. По этой причине проводится предварительная обработка само́й цифровой голограммы, представляющей собой двумерный дискретный по пространству и квантованный по уровням серого массив интенсивностей, а также обработка и повышение качества восстановленных изображений частиц.

Вопросы повышения качества голографических изображений частиц, в том числе путём предварительной обработки голограммы, рассмотрены в работах [4-6]. В этих же работах достаточно подробно обсуждается методика создания так называемого голографического видео, т. е. видеофильма, скомпонованного из голографических данных. Такая методика позволяет количественно описывать динамику движения каждой частицы — скорость, траекторию движения, повороты.

В данной работе предложен алгоритм обработки восстановленных голографических изображений, основанный на последовательном использовании линейного контрастирования, гаммакоррекции и медианной фильтрации [19]. Использование именно такой последовательности объясняется тем, что с помощью линейного контрастирования значительно повышается контраст голографического изображения, гамма-коррекция минимизирует влияние помех, присутствующих в изображении, а медианная фильтрация убирает импульсные шумы и частично спекл-структуру. Данная последовательность позволяет эффективно обрабатывать голографические изображения, при этом минимально искажая форму частицы. Рассмотрим более подробно методы, выбранные для обработки изображений.

1) Первой процедурой является линейное контрастирование. Данная процедура предназначена для преобразования изображения таким образом, что оно занимает бо́льший динамический диапазон по яркости. В результате улучшается визуальное восприятие изображения и упрощается процедура последующей его фильтрации.

Пусть f и g — яркости текущего пиксела исходного и преобразованного изображений соответственно, f_{\min} , f_{\max} , g_{\min} , g_{\max} — минимальные и максимальные интенсивности в исходном и преобразованном изображениях соответственно. В этом случае процедура линейного контрастирования описывается формулой

$$g = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \left(g_{\max} - g_{\min} \right) + g_{\min}.$$
 (1)

2) При осуществлении гамма-коррекции исходное изображение преобразуется по степенному закону, представленному соотношением

$$g = c \left(f + f_0 \right)^{\gamma},\tag{2}$$

где c, f_0, γ — неотрицательные константы. На практике часто используются следующие значения параметров: $c = 1, f_0 = 0, \gamma = 0, 5$.

3) Метод медианной фильтрации является эффективным при подавлении аддитивного шума и особенно эффективен при подавлении импульсного пространственного шума. Медианный фильтр



Рис. 2. Пример обработки изображения планктонной частицы (Epischura baicalensis): голограмма планктонной частицы (a), восстановленное голографическое изображение (исходное изображение для повышения качества, δ), линейное контрастирование (e), использование гамма-фильтра (z), применение медианного фильтра (d), бинаризованное изображение (e)

реализуется как локальная обработка скользящим окном заданной формы (квадрат, ромб, крест), которое включает нечётное число отсчётов изображения. Для каждого положения окна попавшие в него отсчёты упорядочиваются по возрастанию (либо убыванию) яркости. Средний отсчёт в этом упорядоченном списке называется медианой рассматриваемой группы из N отсчётов (N — количество пикселов в скользящем окне), для него существует (N - 1)/2 отсчётов, меньших или равных ему по яркости и столько же бо́льших или равных. Этим значением заменяют центральный отсчёт в окне для обработанного сигнала.

В результате применения медианного фильтра наклонные участки и резкие перепады (скачки) яркости на изображениях не изменяются, что является очень полезным свойством для большого класса изображений. Импульсные помехи, «длительность» которых составляет менее половины окна, подавляются. Чем больше окно, тем более крупные детали стираются.

На рис. 2 приведён пример обработки голографического изображения планктонной частицы (Epischura baicalensis) при помощи описанного алгоритма. Визуально заметно улучшение качества изображения частицы в результате обработки.

С использованием вышеупомянутых критериев качества можно количественно оценивать эффективность этого алгоритма и принимать решение об остановке его работы при достижении заданного граничного контраста и граничного перепада. Так, например, для приведённого на рис. 2 случая граничный контраст и граничный перепад исходного изображения планктонной частицы (рис. 26) составили 1,89 и 0,22 соответственно, что меньше требуемых значений, указанных выше (в разделе 1.2) и определённых в [18].

После линейного контрастирования, использования гамма-фильтра и применения медианного фильтра (рис. 2*d*) граничный контраст и граничный перепад изображения увеличились до 3,30 и 0,64 соответственно, что указывает на существенное улучшение качества и его приемлемость для последующей работы по определению геометрических параметров частицы. Дальнейшая бинаризация изображения (рис. 2*e*) обеспечивает максимальные возможные граничный контраст и граничный перепад.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И КООРДИНАТ ЧАСТИЦ

3.1. Определение положения плоскости наилучшей фокусировки с использованием граничного контраста и граничного перепада

Определить размеры частиц, их площади сечения и параметры формы по цифровым голографическим изображениям можно достаточно очевидным образом. Однако во многих задачах необходимо по голографическим изображениям частиц определить их координаты (для исследования взаимного расположения частиц, реконструкции траекторий их движения и т. д.). Наиболее сложной такая задача является для больши́х частиц (с размерами от сотен микрометров до единиц миллиметров). В качестве продольной координаты частицы (расстояние от плоскости регистрации голограммы) обычно используется положение плоскости наилучшей фокусировки [4, 20–22] голографического изображения частицы, т. е. плоскости, в которой изображение наблюдается наиболее резко. В качестве поперечных координат обычно используются координаты центра тяжести изображения частицы в этой плоскости. Таким образом, определение плоскости наилучшей фокусировки является ключевым при интерпретации голографического изображения объёма, содержащего частицы.

Для определения продольной координаты частицы традиционно используются методы Тэненград, энтропийный метод, метод Брэннер, дисперсионный [22] и корреляционный [21] методы и т. д. Перечисленные методы удобны с точки зрения их программной реализации, но обладают невысокой точностью (не более 1 мм). В работах [20, 23] положение плоскости наилучшей фокусировки предложено определять при помощи вышеупомянутых критериев качества (граничного контраста и граничного перепада). Плоскость наилучшей фокусировки изображения частицы, соответствующая её продольной координате, определяется по их максимуму.

В данной работе предложенный метод определения продольной координаты частицы сравнивается с традиционно используемыми на примере численно рассчитанных голограмм плоской непрозрачной квадратной частицы со стороной 200 мкм для расстояний регистрации 200÷600 мм. При моделировании голограммы размер пиксела (7,4 мкм) и размер ПЗС-матрицы (1200 × × 1600 пикселов) соответствовали камере «Видеоскан 2020», которая использовалась в экспериментах данной статьи. Расчёт выполнялся для длины волны излучения гелий-неонового лазера (0,63 мкм). Восстановление голограммы выполнялось методом свёртки послойно с шагом по продольной координате 0,1 мм, а плоскость наилучшей фокусировки определялась традиционно используемыми и предложенными в работе методами. Зависимости смещения $\delta_{\Pi H \Phi}$ (ошибки определения) положения плоскости наилучшей фокусировки на этапе восстановления изображения частицы различными способами от расстояния регистрации голограммы l приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что методы, в которых критерием положения плоскости наилучшей фокусировки является максимальный граничный контраст или граничный перепад, обладают разбросом значений не более 0,2 мм, что может служить оценкой их погрешности. Метод Тэненград при



Рис. 3. Смещение плоскости наилучшей фокусировки для голограммы квадратной частицы, рассчитанной различными методами: метод, где критерием является максимальный граничный контраст (1) или граничный перепад (2), метод Брэннер (3), дисперсионный (4) и энтропийный (5) методы, метод Тэненград с порогом 50% (6) и 0% (7); l — расстояние регистрации голограммы

данном моделировании показал примерно такую же точность, однако в экспериментах с реальными голограммами его погрешность была существенно выше. Дисперсионный и энтропийный методы даже при моделировании имеют гораздо бо́льшую погрешность определения положения плоскости наилучшей фокусировки.

Таким образом, упомянутые критерии качества (граничный контраст и граничный перепад), разработанные и исследованные в работах [16, 17], не только позволяют количественно характеризовать качество восстановленных голографических изображений частиц, но и обеспечивают возможность более точного определения геометрических параметров и координат частиц по этим изображениям [18, 20, 23].

3.2. Влияние искажений формы волнового фронта на этапе записи

Ещё одно применение критериев качества (граничного контраста и граничного перепада) в данной работе иллюстрируется экспериментом по исследованию влияния несоответствия формы волнового фронта на этапах записи и восстановления голограммы на определение плоскости наилучшей фокусировки. Отметим, что на этапе записи имеется в виду реальный волновой фронт (обычно на этом этапе используется плоский волновой фронт, нормально падающий на плоскость регистрации цифровой голограммы). На этапе восстановления, т. е. при численном расчёте дифракционного интеграла, также считается, что фаза в плоскости голограммы постоянна. В данном разделе исследована ситуация, когда освещающая голограмму опорная волна отличается от плоской, что в той или иной степени соответствует реальным условиям. Существенное отличие может быть обусловлено, например, разъюстировкой формирователя освещающего пучка при ударе погружаемой голографической камеры о борт корабля или скалу, а также от вибрации при голографировании в производственных условиях.

В данной работе выполнен численный эксперимент, в котором при регистрации голограммы плоской непрозрачной квадратной частицы (сторона 200 мкм) использовалась сферическая волна с заданной кривизной волнового фронта (рассматривались радиусы кривизны 50 и 250 м, что соответствует возможной разъюстировке освещающей оптической системы), а восстановление

Для численного расчёта голограммы частицы её освещение моделировалось сферической волной с заданной кривизной волнового фронта. Расчёт голограммы выполнялся при помощи дифракционного интеграла Кирхгофа—Френеля, где комплексная амплитуда волны, распространяющейся за частицей на этапе её голографической регистрации, задавалась как произведение амплитудного пропускания частицы (предметного кадра), единичной амплитуды и фазового мно-



Рис. 4. Влияние изменения формы волнового фронта на этапе регистрации голограммы на положение плоскости наилучшей фокусировки для R = 250 м (треугольники) и R = 50 м (квадраты)

жителя освещающей сферической волны $\exp[ik(x^2+y^2)/(2R)]$. Здесь x и y — координаты в плоскости расположения частицы на этапе регистрации, k — волновое число, R — радиус кривизны волнового фронта. При расчётах длина волны лазерного источника задана равной 0,63 мкм (гелийнеоновый лазер). Численно рассчитанные описанным способом для расстояний 200÷600 мм голограммы квадратной частицы восстановлены, в каждом случае методом граничного перепада определено положение плоскости наилучшей фокусировки частицы. Результаты численного эксперимента представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при рассмотренном изменении формы волнового фронта на этапе регистрации голограммы несоответствие плоскости наилучшей фокусировки реальной продольной координате частицы может быть значительным (например, для расстояния 600 мм и длины волны 0,63 мкм смещение может составлять 7,2 мм).

4. ПОСТРОЕНИЕ УСРЕДНЁННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ ОБЪЁМА

При правильном выборе параметров камеры, реализации алгоритмов повышения качества голографического изображения, точном определении координат и т. д., на этапе восстановления с одной голограммы можно извлечь данные о размерах, формах, координатах всех частиц исследуемого объёма среды. Это достаточно большой объём информации, который в некоторых случаях является избыточным. По этой причине извлечение из голограммы полезной информации является достаточно сложной и ресурсоёмкой задачей, в некоторых случаях при восстановлении информацию необходимо дозировать, а её получение автоматизировать. Для автоматизации процесса определения характеристик частиц в работе [24] предложен метод двумерного отображения голографического изображения объёма среды с частицами, восстановленного из цифровой голограммы, на котором все частицы объёма заданной глубины сфокусированы и имеют резкую границу.

Метод обеспечивает одновременное представление сфокусированных изображений всех частиц объёма в одной плоскости при одновременном сохранении информации о трёхмерном расположении каждой частицы (рис. 5). Такое представление позволяет оперативно в автоматическом режиме одновременно для каждой частицы уточнить положение плоскости наилучшей фокусировки её изображения и определить её геометрические параметры (размер, координаты, ориентацию и т. д.). При автоматизации процесса определения параметров частиц одновременно реализована процедура построения усреднённых характеристик и распределений: распределение частиц по размерам, ориентациям, слоям объёма и т. д.





Рис. 5. Определение параметров частиц по двумерному отображению голографического изображения объёма среды с частицами: двумерное отображение (*a*) и соответствующее трёхмерное распределение частиц в объёме (*б*); *z* — продольная координата

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены основные этапы процесса голографического исследования частиц. При этом главное внимание уделено наиболее сложному этапу — определению характеристик частиц по данным, восстановленным из цифровых голограмм. Для оценки репрезентативности этой информации использованы количественные критерии качества голографического изображения.

Эти критерии использованы также для определения положения частицы в пространстве по положению плоскости наилучшей фокусировки её голографического изображения. При этом показано, что критерии обеспечивают существенно более высокую точность (0,2 мм) по сравнению с другими методами. Показано, что за счёт изменения кривизны волнового фронта на этапе записи цифровой голограммы частицы могут возникать существенные погрешности в определении положения плоскости наилучшей фокусировки.

Разработан алгоритм повышения качества голографического изображения частицы, эффективность которого также оценивается с использованием критериев качества.

Обсуждена методика двумерного отображения голографического изображения объёма среды с частицами, позволяющая автоматизировать процесс извлечения информации из цифровой голограммы частиц.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания при финансовой поддержке Минобрнауки России (код проекта 1975).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Дёмин В. В., Степанов С. Г. // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 9. С. 833.
- 2. Fugal J. P., Shaw R. A. // Atmos. Meas. Tech. 2009. No. 2. P. 259.
- 3. Дёмин В. В., Донченко В. А., Чистякова Л. К. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1, № 4. С. 57.

В. В. Дёмин, Д. В. Каменев

2014

- 4. Дёмин В. В., Ольшуков А. С. // Оптический журн. 2012. Т. 79, № 6. С. 42.
- Дёмин В. В., Ольшуков А. С., Наумова Е. Ю., Мельник Н. Г. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1089.
- 6. Дёмин В. В., Ольшуков А. С., Дзюба Е. В. // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53, № 8. С. 81.
- 7. Thompson B. J. // Res. Development. 1974. V. 18, No. 7. P. 20.
- 8. Стаселько Д.И., Косниковский В.А. // Оптика и спектроскопия. 1973. Т. 34, вып. 3. С. 365.
- Watson J., Burns N. // EOS Annual Meeting 2012, Aberdeen, Scotland, UK, 25–28 September 2012. V.7.
- 10. Дёмин В. В., Каменев Д. В. // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 11. С. 61.
- 11. Pfitsch D. W., Malkiel E., Ronzhes Y., et al. // Proc. MTS/IEEE Oceans. 2005. P. 690.
- 12. Sun H., Hendry D. C., Player M. A., Watson J. // IEEE J. Ocean. Eng. 2007. V. 32. P. 373.
- Дёмин В. В., Половцев И. Г., Ольшуков А. С., Каменев Д. В. // Голография: теоретические и прикладные вопросы. Материалы XXVIII Школы-симпозиума по голографии и когерентной оптике, 22–26 августа 2013 г. Нижний Новгород: Изд-во Нижегород. ун-та, 2013. С. 100.
- Dyomin V. V., Polovtsev I. G., Olshukov A. S., Kamenev D. V. // EOS Annual Meeting 2012 (EOSAM 2012), Aberdeen, Scotland, UK, 25–28 September 2012. V. 7.
- Дёмин В. В., Половцев И. Г., Ольшуков А. С. // Сб. трудов Международной конф. «Фундаментальные проблемы оптики — 2012», Санкт-Петербург, 15–19 октября 2012 г. С. 565.
- 16. Дёмин В. В., Каменев Д. В. // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53, № 9. С. 46.
- 17. Дёмин В.В., Каменев Д.В. // Оптический журн. 2012. Т. 79, № 4. С. 17.
- 18. Дёмин В. В., Каменев Д. В. // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8. С. 68.
- 19. Сойфер В.А. Методы компьютерной обработки изображений. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
- Dyomin V. V., Kamenev D. V. // EOS Annual Meeting 2012, Aberdeen, Scotland, UK, 25–28 September 2012. V. 7.
- 21. Yang Y., Kang B., Choo Y. // Appl. Opt. 2008. V. 47, No. 6. P. 817.
- 22. Santos A., Solorzano C. O., Vaquera J. J., et al. // J. Microscopy. 1997. V. 188, No. 3. P. 264.
- Dyomin V. V., Olshukov A. S., Kamenev D. V. // Proc. "Oceans'11", Santander, Spain, 6–9 June 2011. Art. no. 110131-015
- 24. Дёмин В. В., Каменев Д. В. // Оптический журн. 2013. Т. 80, № 7. С. 58.

Поступила в редакцию 9 декабря 2013 г.; принята в печать 30 июня 2014 г.

METHODS OF PROCESSING AND RETRIEVAL OF INFORMATION FROM DIGITAL HOLOGRAMS OF PARTICLES AND THEIR PRACTICAL USE

V. V. Dyomin and D. V. Kamenev

We consider a holographic study of particles. The main attention is focused on retrieval of information from a digital hologram, namely, determination of the characteristics of a particle and its holographic image. To estimate the efficiency of this stage, we used quantitative criteria of the holographic image quality. These criteria were also used to determine the position of a particle in space, which provides a significantly higher accuracy (an error of about 0.2 mm) compared with other methods. An algorithm for increasing the quality of the holographic image of a particle is developed. A method of two-dimensional holographic mapping of the volume of a medium with particles for automatic retrieval of information from the digital hologram of particles is discussed.

В. В. Дёмин, Д. В. Каменев

2014