

ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 535.778.38:004.932

Точность определения продольных координат частиц методом цифровой голографии

В.В. Демин, А.Ю. Давыдова, И.Г. Половцев,
Н.Н. Юдин[✉], М.М. Зиновьев*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 1.09.2022 г.;
после доработки 12.10.2022 г.;
принята к печати 28.10.2022 г.

Основываясь на известных выражениях, применяемых к дифракционно-ограниченным оптическим системам, приведены оценки и предложен способ определения погрешности измерения продольных координат частиц по изображениям, восстановленным из цифровых голограмм. Определен поправочный коэффициент для визуальной фокусировки при различных удалениях регистрируемой частицы от плоскости КМОП-матрицы. Приведены экспериментальные результаты апробации способа. Показано, что погрешность автоматической цифровой фокусировки может быть уменьшена путем одновременного применения фокусирующих кривых для нескольких показателей качества и оптимизации области изображения для их построения.

Ключевые слова: цифровая голография частиц, восстановленные изображения частиц, продольные координаты частиц, погрешность, дифракционно-ограниченные системы; digital particle holography, reconstructed particle images, longitudinal coordinates of particles, error, diffraction-limited systems.

Введение

Цифровая голография частиц применяется в решении целого ряда задач (в основном используется осевая схема записи [1–3]) с целью определения размеров, форм, координат и идентификации взвешенных частиц различной природы [4–9]. Такие частицы встречаются достаточно часто в различных средах: газах, жидкостях и твердых телах, образуя взвеси (золи) — многофазные системы, соответственно, аэрозоли, гидрозоли и солидозоли. Примерами таких взвесей и образующих частиц являются: аэрозольные частицы, капли в факеле распыла форсунок, планктон и другие частицы в морской воде (морской снег, твердые неорганические частицы, газовые пузыри и т.п.), эритроциты, объемные дефекты и включения в оптических материалах и др.

Для подобных исследований частиц в предыдущих наших работах [4, 5, 8] представлена ДНС-технология (ДНС — Digital Holographic Camera, или цифровая голографическая камера), которая включает в себя:

— регистрацию цифровой голограммы объема среды с частицами;

— последующую послойную с заданным шагом численную реконструкцию изображений поперечных сечений объема среды и фиксацию продольной координаты каждого поперечного сечения;

— обнаружение сечений, содержащих сфокусированные изображения частиц (продольная фокусировка, как в микроскопии);

— определение продольных и поперечных координат, размеров и форм частиц и их распознавание.

Данное направление исследований в настоящее время активно развивается [10–15]. Не представляет особой сложности определение поперечных координат путем нахождения центра тяжести восстановленного изображения частицы. Однако работ, посвященных анализу погрешностей измерения продольных координат и размеров взвешенных частиц средствами цифровой голографии, немного.

Точное определение координат необходимо при отбраковке дефектных материалов (например, нелинейных кристаллов), содержащих включения (дефекты), при их раскрое на рабочие элементы.

Настоящая работа посвящена исследованию точности определения продольных координат частиц по их голографическому изображению.

В [5] показано, что погрешность определения продольной координаты имеет порядок 100–200 мкм, что сравнимо, а иногда и превосходит размер анализируемой частицы. Однако даже такая не очень высокая точность может быть не достигнута. Это связано с дифракцией света на апертуре голограммы

* Виктор Валентинович Демин (dyomin@mail.tsu.ru); Александра Юрьевна Давыдова (starinshikova@mail.ru); Игорь Георгиевич Половцев (polovcev_i@mail.ru); Николай Николаевич Юдин (rach3@yandex.ru); Михаил Михайлович Зиновьев (mixxxan_08@mail.ru).

частицы и существенно зависит от расстояния L до реконструированного изображения частицы. Данный вопрос хорошо изучен и описан для дифракционно-ограниченных оптических систем формирования оптических изображений [2, 10]. Однако нам не удалось найти работ, посвященных экспериментальным исследованиям влияния дифракционной неопределенности изображения на погрешность цифровой фокусировки, хотя описываемый эффект, очевидно, вносит существенный вклад в погрешность определения продольных координат регистрируемых частиц.

Целью нашего исследования является получение экспериментальных данных о погрешности цифровой фокусировки и их сопоставление с теоретическими оценками размеров спеклона для дифракционно-ограниченных оптических систем формирования изображений.

1. Измерительная цифровая голографическая камера

Пример осевой схемы ДНС приведен на рис. 1. В качестве источника опорной волны в работе [4] используется лазерный диод 1, генерирующий излучение в непрерывном режиме с длиной волны 1,064 мкм со средней мощностью 100 мВт (в [8] используется лазерный диод видимого диапазона). Световой пучок лазерного диода расширяется с помощью эспандера 2. Затем излучение необходимой расходимости и диаметра попадает на исследуемый образец 3 (в [4] это нелинейный кристалл, в объеме которого необходимо диагностировать дефекты, в [8] — объем воды с планктонными частицами). Часть этого излучения рассеивается исследуемой частицей 4, образуя предметную волну. Опорная волна формируется той частью излучения, которая прошла исследуемую среду без рассеяния на частицах. Интерференционная картина опорной и предметной волн записывается в цифровом виде в память компьютера с помощью КМОП-камеры 5 Baumer VEXG-100M.R. Двумерный массив дискретных квантованных значений интенсивности упомянутой интерференционной картины и является цифровой голограммой.

Восстановление голографических изображений на расстоянии z производится с помощью расчета

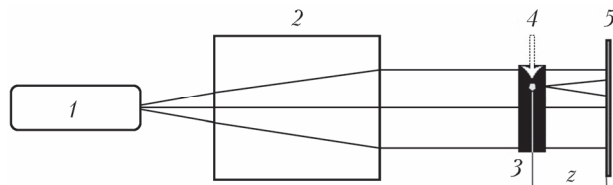


Рис. 1. Схематическое изображение ДНС: 1 — источник когерентного излучения; 2 — эспандер пучка; 3 — регистрируемый объем среды (образец); 4 — частица (дефект); 5 — регистрирующее устройство — КМОП-матрица; z — численно полученное расстояние от плоскости записи голограммы до плоскости наилучшего восстановления голографического изображения

дифракционного интеграла из исходного распределения интенсивности зарегистрированной голограммы. Подробнее это описано в публикациях [1, 2, 17]. Изменяя расстояние z с определенным оператором шагом, программный комплекс рассчитывает распределение интенсивности в различных сечениях исследуемого объема и слой за слоем формирует его виртуальное объемное изображение. При этом в каждом восстановленном изображении сечения выделяются изображения частиц, определяются их размеры, форма, ориентация, расположение внутри исследуемого объема и производится замена реальных частиц на их цифровые образы (паттерны). Так формируется цифровой портрет исследуемой среды со взвешенными в ней частицами.

В настоящей работе в качестве тест-объекта для калибровки использовалась модельная частица в виде непрозрачного квадрата со стороной 500 мкм, выполненного методом фотолитографии по хрому на стеклянной подложке, толщина частицы составляла 200 нм (рис. 2).

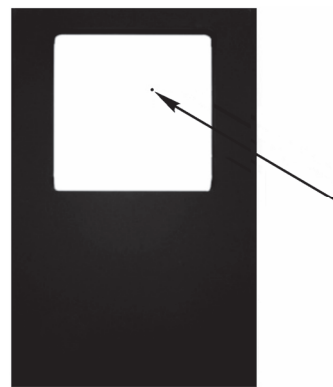


Рис. 2. Модельная частица, нанесенная на стеклянную пластину (отмечена стрелкой), размещенную в металлическом держателе

2. Методика расчета продольных размеров спеклона, сформированного при регистрации цифровой голограммы, и восстановления голографического изображения

Для дифракционно-ограниченных оптических систем формирования изображений в работе [16] показано, что элемент изображения (пиксель) может быть представлен как объемное тело (сигара, спеклон). Этот элемент имеет поперечный размер

$$2\rho = 1,22 \frac{\lambda}{A} \quad (1)$$

и продольный

$$2\Delta z = \left(\frac{\lambda}{A^2} \right) \approx \frac{(2\rho)^2}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ — длина волны; A — числовая апертура оптической системы (со стороны изображения), используемой для формирования изображения.

Числовая апертура некогерентной оптической системы определяется с помощью вполне конкретных конструктивных параметров: диаметра выходного зрачка оптической системы D и расстояния L от задней главной плоскости до изображения, не зависящих от размера частицы.

То же самое можно применить к ДНС и записать $A = D_h / 2L$, где D_h — диаметр области, занимаемой голограммой частицы; L — расстояние от голограммы до изображения частицы, численно восстановленного из нее. Причем в отличие от некогерентной оптической системы D_h зависит от размеров частицы. Например, для круглой непрозрачной частицы область, занимаемая голограммой в дальнем поле, является картиной дифракции Фраунгофера на этой частице. В работах [7, 17] представлены оценки размеров голограмм, необходимых для восстановления изображения частиц различной формы, соответствующих заданному критерию качества. В такой интерпретации соотношения (1) и (2) позволяют определить размеры спеклона в пространстве изображения при реконструкции голографического изображения частицы (рис. 3). Соответствующие погрешности в определении размеров и координат объектов в пространстве (в исследуемом объеме) могут быть вычислены с учетом показателя преломления среды, в которой физически находятся частицы. Для простоты здесь принято, что показатель преломления среды, в которой записываются и восстанавливаются голограммы, равен 1. Таким образом, выражение (2) для ДНС-системы можно переписать как

$$2\Delta z_h = k_h \left(\frac{\lambda \cdot L^2}{D_h^2} \right). \quad (3)$$

Выражение (3) представляет собой погрешность определения продольных координат объекта

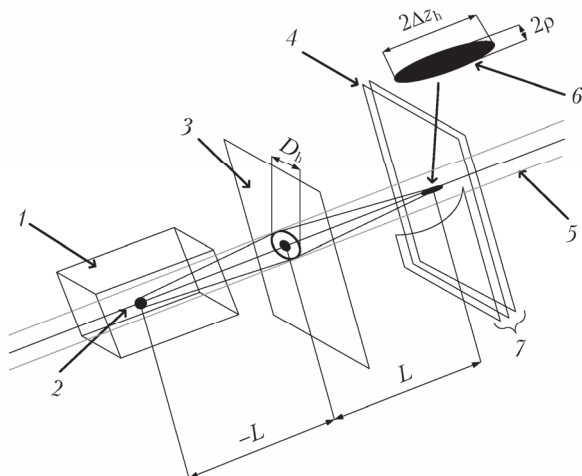


Рис. 3. Запись цифровой голограммы частицы и реконструкция ее изображения: 1 — анализируемый объем среды; 2 — частица; 3 — цифровая голограмма; 4 — плоскость наилучшего восстановленного голографического изображения частицы; 5 — регистрирующий (реальный) пучок; 6 — элемент разрешения цифровой голографической системы (спеклон); 7 — набор плоскостей для анализа и выбора плоскости наилучшего изображения, сформированный по результатам численного восстановления цифровой голограммы

по цифровой голограмме; k_h — коэффициент, определяемый эмпирически в зависимости от способа фокусировки.

Что касается параметра D_h , то максимальной апертурой, ограничивающей ход лучей и область интегрирования при вычислении дифракционного интеграла, в цифровой голографической системе является размер регистрирующей матрицы a . Для регистрации картины интерференции опорной и предметной волн необходимо, чтобы размер пикселя был меньше периода интерференционных полос. А это, помимо параметров самой КМОП-матрицы камеры (размер матрицы, размер пикселей, общее число пикселей), зависит от области дифракции, в которой регистрируются голограммы, или, другими словами, от расстояния между частицей и плоскостью регистрации голограммы.

В работе [17] исследованы требования, необходимые для достижения заданного качества изображения, и показано, что в зависимости от формы, размера частицы и расстояния между частицей и плоскостью регистрации голограммы меняется требуемый размер регистрируемой части дифракционной картины.

Для ДНС-технологии выберем такую конфигурацию схемы с регистрацией голограммы в области дифракции Френеля, когда ограничивающим фактором для дифракционной картины является матрица (рис. 4), что заведомо больше всех возможных требований, приведенных в [17].

Тогда с учетом $D_h \approx a$ формула (3) запишется в виде

$$2\Delta z_h = k_h \left(\frac{\lambda \cdot L^2}{a^2} \right), \quad (4)$$

где $a = 6,44$ мм — размер меньшей стороны матрицы.

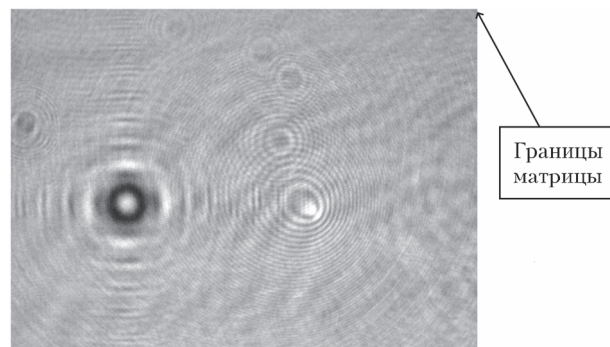


Рис. 4. Голограмма квадратной частицы размером 500×500 мкм, расположенной на расстоянии $z = 135$ мм от регистрирующей матрицы с размером меньшей стороны $a = 6,44$ мм

Это соотношение может быть использовано для определения возможных расстояний между частицей и плоскостью регистрации голограммы или для установления ограничений на длину исследуемого объема с частицами (глубину сцены голографирования).

3. Оценка погрешности определения продольных координат модельной частицы при визуальной фокусировке

Цифровые голограммы тест-объекта, изображенного на рис. 2 и находящегося на различном удалении L от матрицы фотоприемника, регистрировались по схеме, приведенной на рис. 1, для пяти расстояний L (табл. 1). На этапе восстановления изображения перебор расстояний z в дифракционном интеграле производился с заданным шагом (50 мкм) в пределах вероятного расположения изображения. В результате вычисления дифракционного интеграла формировался массив распределений интенсивности (далее — восстановленных изображений) в плоскостях z (см. рис. 3), всего 100 плоскостей для каждого расстояния L . Таким же способом строится набор восстановленных из голограммы изображений поперечных сечений исследуемого объема с частицами.

Восстановленные изображения просматриваются оператором с определением плоскостей наилучшего изображения модельной частицы (тест-объекта), оцениваемого визуально по его наилучшей резкости. Для каждой из пяти голограмм резкость настраивалась 10 раз. Таким образом, для каждой голограммы получено $N = 10$ значений продольной координаты плоскости наилучшего изображения z_v^i .

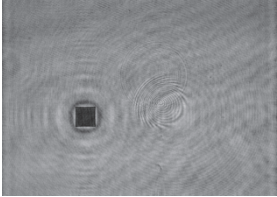
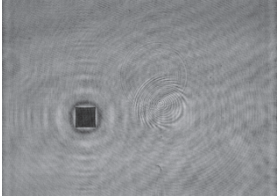
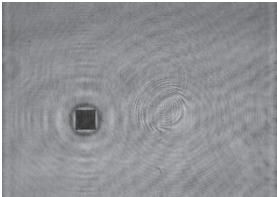
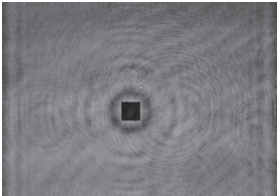
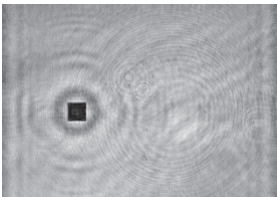
Для каждой серии из 10 измерений по определению продольной координаты плоскости наилучшего изображения рассчитывалось среднее значение z_v^{av} и среднеквадратичная ошибка его определения Δz_v^{av} стандартными методами [18, 19].

Для нахождения доверительного интервала значения продольной координаты плоскости наилучшего изображения было использовано t -распределение Стьюдента с доверительной вероятностью 95% и $N = 10$:

$$\Delta z_v = 2,3 \cdot \Delta z_v^{av}. \quad (5)$$

Т а б л и ц а 1

Данные визуальных измерений для оценки k_v

k_v	z_v^{av} , мм	$2\Delta z_v$, мкм	Δz , мкм	L , мм	Изображение модельной частицы в плоскости наилучшего изображения
0,16	81,86	114	690	81,7	
0,14	120,69	213	1478	120,5	
0,13	136,6	238	1870	135,5	
0,15	151,4	350	2390	151	
0,17	166,1	485	2828	165,9	

Определим поправочный коэффициент k_v для визуальной фокусировки:

$$k_v = \frac{2\Delta z_v}{2\Delta z}, \quad (6)$$

где $2\Delta z$ — продольный размер спеклона по формуле (2) с учетом $D_h \approx a$.

В табл. 1 приведены данные визуальных измерений тест-объекта для оценки k_v .

На основании данных табл. 1 получим оценку k_v для визуальной фокусировки:

$$k_v = 0,15 \pm 0,02. \quad (7)$$

4. Оценка погрешности определения продольных координат модельной частицы при цифровой фокусировке

В эксперименте использовался тот же массив распределений интенсивности (далее — восстановленных изображений) в плоскостях 7 (см. рис. 3), всего 100 плоскостей для каждого расстояния L .

Восстановленные изображения модельных частиц из сформированных массивов распределений интенсивности подвергнуты цифровой обработке с применением таких показателей качества изображения [17, 20–26], как граничный контраст, граничный перепад и тененград (tenengrad).

Для расчета граничного перепада и граничного контраста [17, 20, 24] вдоль края восстановленного изображения модельной частицы выделяются внешняя (соответствующая фону) и внутренняя (соответствующая непосредственно изображению частицы) области (рис. 5), прилегающие к этой границе, и в них рассчитываются средние интенсивности.

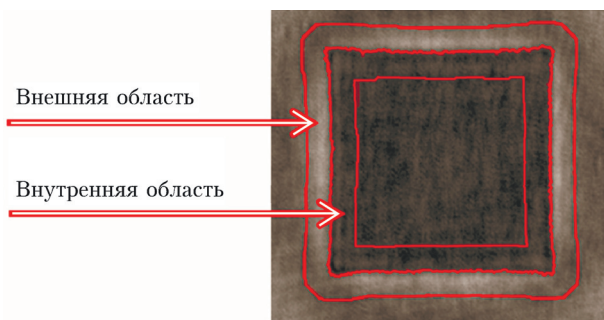


Рис. 5. Внутренняя и внешняя области при определении показателя качества

Ширина областей задается равной 10% от размера изображения частицы. Граничный контраст определяется как

$$K = \frac{\langle I_{IA} \rangle}{\langle I_{EA} \rangle},$$

где $\langle I_{IA} \rangle$ — средняя интенсивность во внутренней области; $\langle I_{EA} \rangle$ — во внешней.

Граничный перепад вычисляется по формуле

$$P = \frac{|\langle I_{EA} \rangle - \langle I_{IA} \rangle|}{\langle I \rangle},$$

где $\langle I \rangle$ — среднее значение интенсивности во всем изображении сечения (кадра) в плоскости 7 (см. рис. 3).

Тененград представляет собой величину градиента, которая измеряется суммой квадратов откликов

$$S_x(i, j) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} * I(i, j),$$

$$S_y(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * I(i, j)$$

горизонтальной и вертикальной масок Собеля ($I(i, j)$ — значение интенсивности в (i, j) пикселе изображения; $*$ — операция свертки). Оператор тененград выглядит следующим образом:

$$T = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=0}^{N_y-1} G_{i,j},$$

где $G_{i,j} = \sqrt{S_x(i, j)^2 + S_y(i, j)^2}$; N_x , N_y — количество пикселей изображения.

В качестве плоскости наилучшего изображения принимается та, в которой хотя бы один из показателей качества (граничный контраст, граничный перепад или тененград) достигает максимального значения. На рис. 6 приведены зависимости выбранных показателей качества от дефокусировки, расстройки (фокусировочные кривые) вблизи положения $z = L$ — плоскости наилучшего изображения модельной частицы для тех же случаев, что и для визуальной фокусировки. Максимумы фокусировочных кривых имеют определенную ширину, которая может быть принята за размер спеклона (черные эллипсы).

Данные цифровой фокусировки приведены в табл. 2. Алгоритм обработки позволяет легко определить значение максимума фокусировочной кривой и соответствующую координату z_d , и создается впечатление получения точного результата. Однако, несмотря на такую детерминированность, из рис. 7 отчетливо видно, что положения максимума z_d не везде совпадают друг с другом и с положением изображения L для всех рассмотренных методов построения фокусировочной кривой. Следовательно, изображения, восстановленные в этих плоскостях, могут быть нерезкими и непригодными для анализа. В качестве оценки погрешности такой автоматической фокусировки может быть принята величина $2\Delta z_h \approx 2\Delta z$. В соответствии с формулой (4) однократной цифровой фокусировки следует принять $k_d = 1$.

Полученные результаты указывают на то, что однократная цифровая фокусировка с одним показателем качества изображения не может конкурировать

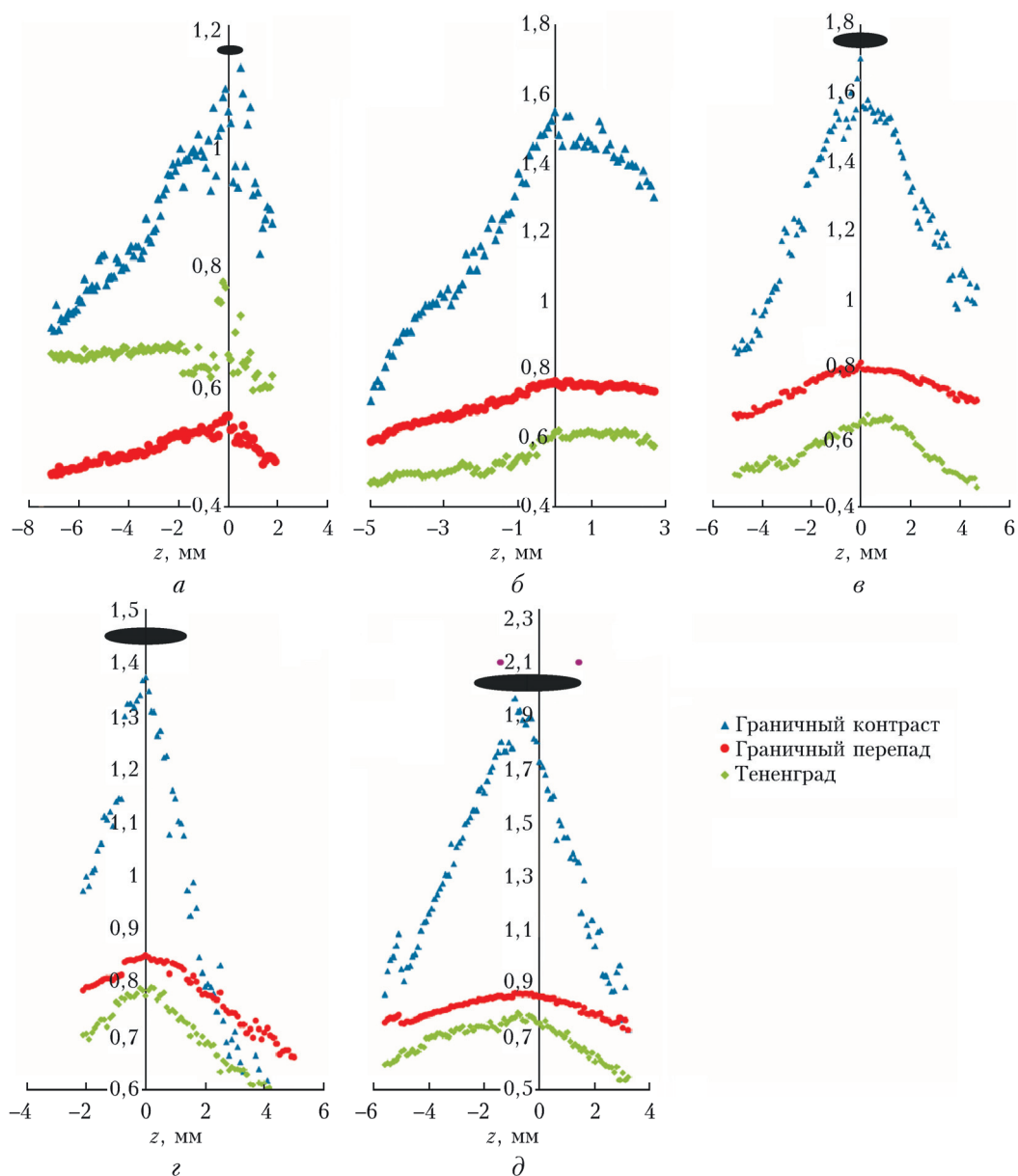


Рис. 6. Кривые при реализации автоматической фокусировки (настройки на плоскость наилучшего изображения) с использованием различных показателей качества для $L = 81,7$ (а); 120,5 (б); 135,5 (в); 151 (г); 165,9 мм (д). В верхней части графиков для каждого расстояния приведено изображение спекла, соответствующее расстоянию (формула (2), с учетом $D_h \approx a$)

с визуальной фокусировкой в связи с отсутствием статистики. Поэтому повысить точность определения продольных координат можно увеличением выборки продольных отсчетов. Причинами случайной погрешности могут быть шумы, связанные с рассеянием средой, в которой находятся частицы, наложение мнимого и действительного изображений и изображений близко расположенных частиц [27]. Это показано на рис. 7, где представлены изображения, полученные в результате натурного голографирования и численного моделирования голографирования непрозрачных модельных шестигранных частиц.

Видно, что при искажениях, связанных с рассеянием средой (рис. 7, а) и наложением мнимого и действительного изображений, присущих осевой схеме (рис. 7, а, б), а также при восстановлении голографического изображения двух близко расположенных частиц происходят искажения в распределении энергии в областях (внутренняя и внешняя, см. рис. 5), которые участвуют в расчете показателей качества. Вследствие этого возникает случайная погрешность ($z_d - L$) определения плоскости наилучшего изображения для разных показателей качества, следовательно, для фокусирующих кривых эта погрешность проявляется по-разному. Это еще раз

Таблица 2

Параметры фокусированной кривой и данные цифровой фокусировки

L	Показатели качества	z_d	$z_d - L$, мкм	Ширина максимума фокусировочной кривой по уровню 0,8 мкм [10]	$2\Delta z$, мкм
81,7	Граничный контраст	82,3	600	1600	690
	Граничный перепад	81,7	0	200	
	Тененград	81,6	-100	200	
120,5	Граничный контраст	120,5	0	500	1478
	Граничный перепад	120,9	400	1500	
	Тененград	120,6	100	1500	
135,5	Граничный контраст	135,5	0	200	1870
	Граничный перепад	135,5	0	200	
	Тененград	135,8	300	600	
151	Граничный контраст	151	0	400	2390
	Граничный перепад	151	0	800	
	Тененград	151,2	200	700	
165,9	Граничный контраст	165	-900	300	2828
	Граничный перепад	165	-900	700	
	Тененград	165,1	-800	800	

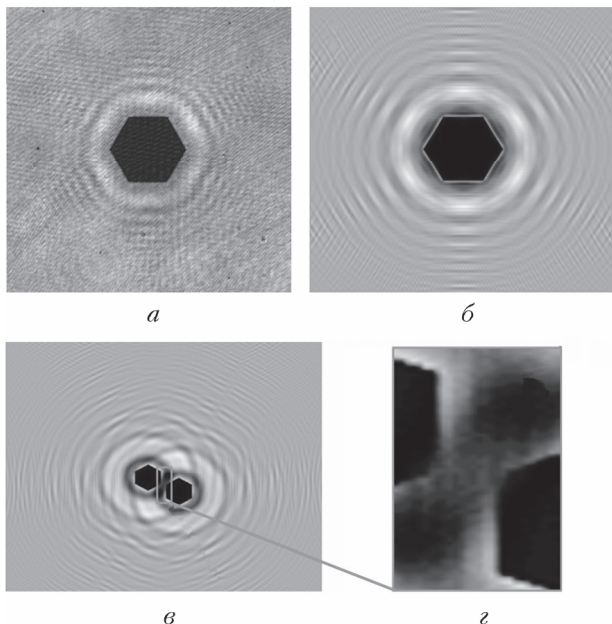


Рис. 7. Голографические изображения, полученные в результате: натурального эксперимента КМОП-камерой (а); численного моделирования голографирования одной (б) и двух (в) непрозрачных шестигранных частиц, находящихся в одной плоскости; расстояние восстановления 460 мм от плоскости

подчеркивает, что для повышения точности определения плоскости наилучшего изображения (вычисления продольной координаты частицы) необходимо одновременно несколько показателей качества.

Заключение

Таким образом, для определения погрешности измерения продольных координат частиц по изображениям, восстановленным из цифровых голограмм, предложены известные выражения для дифракционно-ограниченных оптических систем. Показано,

что для вычисления возможных расстояний между частицей и плоскостью регистрации голограммы может применяться соотношение (4).

Проведенные эксперименты позволили определить поправочный коэффициент для визуальной фокусировки при различных удалениях регистрируемой частицы от плоскости КМОП-матрицы $k_v = 0,15 \pm 0,02$.

Поправочный коэффициент для автоматической цифровой фокусировки $k_v = 1$, если она производится с одним показателем качества восстановленного изображения.

Уменьшение погрешности автоматической цифровой фокусировки может быть достигнуто путем одновременного применения фокусировочных кривых для нескольких показателей качества и оптимизации области изображения для их построения.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 20-17-00185).

Список литературы

1. Dyomin V.V., Gribenyukov A.I., Davydova A.S., Zinoviev M.M., Olshukov A.S., Podzyvalov S.N., Polovtsev I.G., Yudin N.N. Holography of particles for diagnostics tasks [Invited] // Appl. Opt. 2019. V. 58, N 34. P. G300–G309.
2. Yu F.T.S. An Introduction to Diffraction, Information Processing, and Holography. Cambridge: MIT Press, 1973. 427 p.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 521 p.
4. Dyomin V.V., Gribenyukov A.I., Podzyvalov S.N., Yudin N.N., Zinoviev M.M., Polovtsev I.G., Davydova A.Yu., Olshukov A.S. Application of infrared digital holography for characterization of inhomogeneities and voluminous defects of single crystals on the example of ZnGeP₂ // Appl. Sci. 2020. V. 10, N 2. P. 442-1–442-10.
5. Yudin N.N., Pavlov P.V., Zinov'ev M.M., Podzyvalov S.N., Dyomin V.V., Polovtsev I.G., Kuskov I.E.,

- Vol'f I.E., Eysin A.O., Balashov A.A., Kostin A.S. Assessment of fatigue damage of fluoroorganic aircraft glass using digital holography methods // J. Opt. Technol. 2020. V. 88, N 2. P. 72–76.
6. Kemppinen O., Laning J.C., Mersmann R.D., Videen G., Berg M.J. Imaging atmospheric aerosol particles from a UAV with digital holography // Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 16085.
 7. Демин В.В., Ольшук А.С., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г. Цифровая голография планктона // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1089–1095.
 8. Dyomin V., Davydova A., Polovtsev I., Olshukov A., Kirillov N., Davydov S. Underwater Holographic sensor for plankton studies in situ including accompanying measurements // Sensors. 2021. V. 21, N 4863. P. 1–19.
 9. Memmolo P., Miccio L., Merola F., Gennari O., Netti P.A., Ferraro P. 3D morphometry of red blood cells by digital holography // Cytometry A. 2014. V. 85, N 12. DOI: 10.1002/cyto.a.22570.
 10. Nikolaeva T.Y., Petrov N.V. Characterization of particles suspended in a volume of optical medium at high concentrations by coherent image processing // Opt. Eng. 2015. V. 54, N 8. P. 083101.
 11. Vovk T.A., Petrov N.V. Correlation Characterization of Particles in Volume Based on Peak-to-Basement Ratio // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 43840.
 12. Scott D.M. Recent advances in in-process characterization of suspensions and slurries // Powder Technol. 2022. P. 117159.
 13. Chapin S.C., Germain V., Dufresne E.R. Automated trapping, assembly, and sorting with holographic optical tweezers // Opt. Express. 2006. V. 14. P. 13095–13100.
 14. Rodrigo P.J., Eriksen R.L., Daria V.R., Glückstad J. Interactive light-driven and parallel manipulation of inhomogeneous particles // Opt. Express. 2002. V. 10. P. 1550–1556.
 15. Bilsky A.V., Gobysov O.A., Markovich D.M. Evolution and recent trends of particle image velocimetry for an aerodynamic experiment // Thermophys. Aeromech. 2020. V. 27, N 1. P. 1–22.
 16. Born M., Wolf E. Principles of Optics. Cambridge: MIT Press Cambridge: University Press, 1999. 31 p.
 17. Демин В.В., Каменев Д.В. Критерии качества голографических изображений частиц различной формы // Изв. вузов. Физ. 2010. Т. 53, № 9. С. 46–53.
 18. ISO 2602:1980 “Statistical interpretation of test results – Estimation of the mean – Confidence interval”.
 19. Fisher R.A., Rothamsted M.A. Statistical methods for research workers // Metron. 1925. V. 5. P. 90.
 20. Dyomin V.V., Kamenev D.V. Evaluation of Algorithms for Automatic Data Extraction from Digital Holographic Images of Particles // Russ. Phys. J. 2016. V. 58, N 10. P. 1467–1474.
 21. Huang W., Jing Z. Evaluation of focus measures in multifocus image fusion // Pattern Recognit. Lett. 2007. V. 28, N 4. P. 493–500.
 22. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. Prentice Hall. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
 23. Santos A., Ortiz de Solorzano C., Vaquera J.J., Pena J.M., Malpica N., del Pozo F. Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis // J. Microsc. 1997. V. 188, N 3. P. 264–272.
 24. Dyomin V.V., Kamenev D.V. Two-dimensional representation of a digital holographic image of the volume of a medium with particles as a method of depicting and processing information concerning the particles // J. Opt. Technol. 2013. V. 80, N 7. P. 450–456.
 25. Osibote O.A. Automated focusing in bright-field microscopy for tuberculosis detection // J. Microsc. 2010. V. 240, N 2. P. 155–163.
 26. Ватаманюк И.В., Ронжин А.Л. Применение методов оценивания размытости цифровых изображений в задаче аудиовизуального мониторинга // Обработка информации и управление. 2014. Т. 4. С. 16–23.
 27. Davydova A.Y., Dyomin V., Polovtsev I. Evaluation of the effect of noise in a digital holographic system on the quality of reconstructed particle image // Proc. SPIE. 2020. V. 11560. P. 1156020-1–6.

V.V. Dyomin, A.Yu. Davydova, I.G. Polovtsev, N.N. Yudin, M.M. Zinoviev. Accuracy of determination of longitudinal coordinates of particles by digital holography.

Based on known expressions applied to diffraction-limited optical systems, estimates are given and a method is proposed for determining the measurement error of the longitudinal coordinates of particles from images reconstructed from digital holograms. A correction factor for visual focusing is determined for different distances between a detected particle and the plane of a CMOS matrix. The experimental results of testing the method are presented. It is shown that the error of automatic digital focusing can be reduced by simultaneously applying focusing curves for several quality indicators and optimizing the image area for their construction.