ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 55, № 8 ФИЗИКА 2012

УДК 535:778.38:004.932.2

В.В. ДЁМИН, Д.В. КАМЕНЕВ

УСТОЙЧИВОСТЬ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЧАСТИЦ

Исследуется чувствительность критериев качества изображения «граничный контраст» и «граничный перепад» к степени размытия границы изображения, а также к параметрам нормального шума и равномерного фона, в случае их присутствия в изображении. Обсуждаются особенности отклика критериев на изменение ширины областей, выделяемых вдоль границы изображения для расчета критериев. Рассмотрена устойчивость критериев к возможным ошибкам определения границы восстановленного голографического изображения частицы. Приведены результаты численных расчетов и экспериментов, полученных как для бинарного, так и для реального голографического изображения круглой непрозрачной частицы.

Ключевые слова: *критерии качества, цифровая голография частиц, граничный контраст, граничный перепад, шум в изображении, размытие границы изображения, смещение границы изображения, устойчивость критериев.*

Введение

Для повышения достоверности определения характеристик частиц по их голографическим изображениям в различных задачах науки и техники необходима объективная оценка качества этих изображений [1, 2]. Большинство существующих методов оценки качества изображения построены на сравнении полученного изображения с эталоном и поэтому не могут быть использованы во многих реальных ситуациях. В связи с этим в работе [1] предложены критерии для оценки качества изображений, характеризующие границу частицы, а именно средний контраст изображения на границе с фоном (далее – граничный контраст) и средний перепад интенсивности изображения на границе с фоном (далее – граничный перепад).

Для реализации этих критериев вдоль границы 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 максимально возможную интенсивность в изображении. Поскольку эти критерии характеризуют границу частицы, то, очевидно, ширина выделяемых областей должна быть много меньше размера частицы [1]. В настоящей работе конкретизируются требования к ширине выделяемых областей.

В работе [2] показана возможность использования указанных критериев для определения плоскости наилучшей фокусировки восстановленных голографических изображений частиц на примере цифровых голографических изображений модельных частиц и реальной планктонной частицы. Однако основные исследования особенностей и эффективности введённых критериев качества в работах [1, 2] проведены на бинарных изображениях, а также на численно моделированных голографических изображениях частиц.

В настоящей работе исследования проводились как для бинарного (тестового) изображения круглой непрозрачной частицы, так и для ее изображения (см. рис. 1, *б*), восстановленного с численно рассчитанной голограммы. За счет этого уточняются зависимости чувствительности критериев к шуму и фону, наложенному на изображение. Рассматривается устойчивость критериев к возможным ошибкам определения границы восстановленного голографического изображения частицы. При выборе и обосновании пороговых значений критериев качества использовались не только численно рассчитанные, но и реальные голограммы частиц правильной формы, полученные в лабораторном эксперименте.

Исследование чувствительности критериев к параметрам зашумленности изображения

Диаметр бинарного изображения частицы (рис. 1, *а*), используемого в исследованиях, составляет 200 пикселей, голографического – 226 пикселей. Из рис. 1 очевидно изначальное различие в качестве исходных изображений.

Рис. 1. Бинарное (*а*) и голографическое (*б*) изображения круглой частицы

Как и в работе [1], для контролируемого ухудшения резкости границы используется сглаживающий фильтр (размер маски 7×7). Степень размытия границы изображения (оси абсцисс на рис. 2) указывает на количество применений сглаживающего фильтра. На рис. 2, *а*, *б* приведены зависимости, из которых следует, что граничный контраст имеет высокую чувствительность даже к небольшому размытию четкой (бинарной) границы. При расчёте зависимостей рис. 2 ширина выделяемых областей задавалась равной 10 пикселям. Кривые, соответствующие голографическому (менее резкому) изображению, показывают, что при одном и том же диапазоне размытия границы (0–20) оба критерия изменяются практически одинаково (граничный контраст в 2,2 раза, граничный перепад – примерно в 1,7 раза).

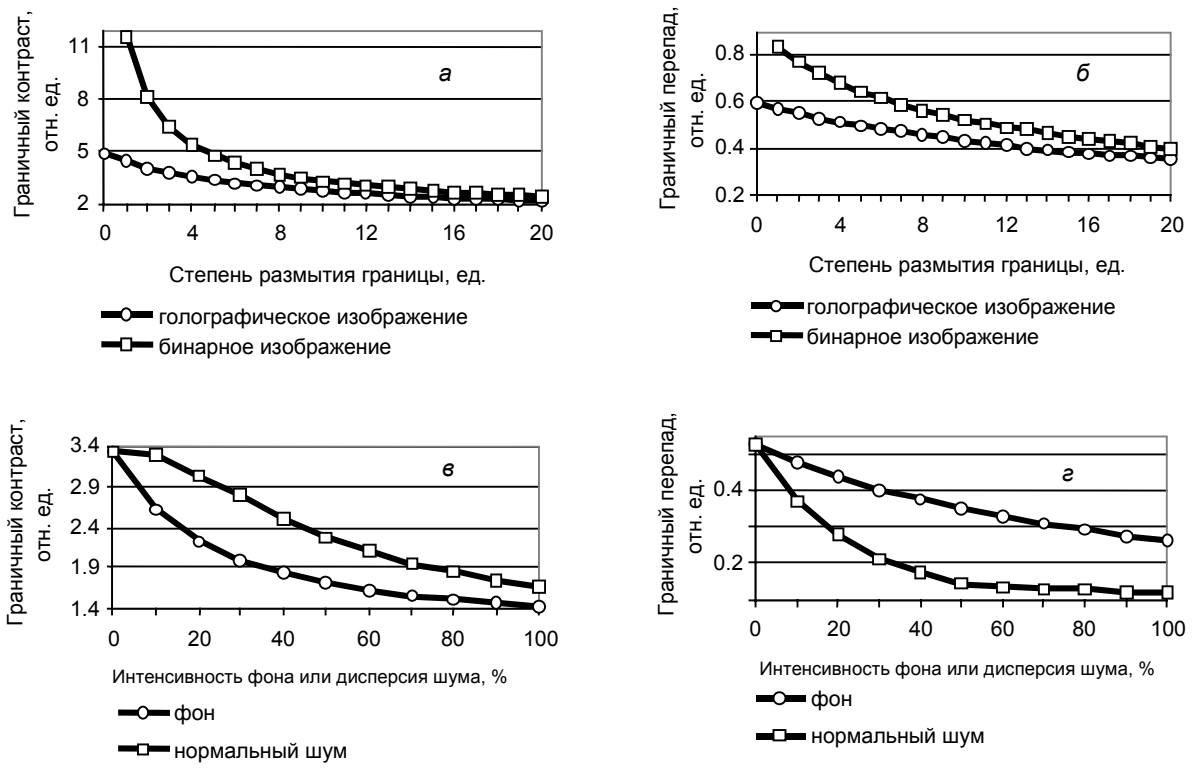

Рис. 2. Зависимости граничного контраста и граничного перепада от степени размытости границы (*а*, *б*) и от интенсивности равномерного фона, дисперсии нормального шума (*в*, *г*)

В работах [1, 2] убедительно показана важность учета чувствительности и устойчивости критериев качества к зашумленности изображения. В связи с этим в настоящей работе путем численного расчета исследовались значения граничного контраста и граничного перепада при наложении нормального шума или равномерного фона на бинарное (без размытия границы при помощи фильтра) изображение частицы (рис. 2, *в*, *г*). При расчёте значений критериев качества ширина выделяемых областей по-прежнему задавалась равной 10 пикселям. Уровень (интенсивность) фо-

на, накладываемого на изображение, задавался в процентах от максимальной интенсивности в изображении, параметры нормально распределенного шума задавались через дисперсию.

Из рис. 2, *в*, *г* видно, что граничный контраст имеет несколько более высокую чувствительность к фону, чем к шуму (изменение критерия на кривых рис. 2, *в* составляет 2,42 и 2 раза соответственно). Граничный перепад, наоборот, существеннее меняется при увеличении дисперсии шума (4,33 вдоль соответствующей кривой на рис. 2, *г*) и слабо чувствителен к фону (1,86). Последнее вполне объяснимо, так как при расчете граничного перепада вычитаются средние интенсивности в выделенных областях, которые содержат одну и ту же фоновую добавку.

Из анализа результатов, приведенных на рис. 2, можно сделать два вывода.

1. Еще раз подтверждается рациональность совместного использования критериев для изображений с заранее неизвестным контрастом границы. При определенных параметрах изображений (с четкой или нечеткой границей, характером зашумления, наличием фоновой составляющей и т.д., см. выше) возможно использование одного из критериев.

2. Известно, что для повышения качества изображения (для использования только информативного диапазона интенсивностей) можно вычесть в каждой его точке (пикселе) интенсивность фона (в некоторых случаях равную средней интенсивности, в случае бинарного изображения равную минимальному значению интенсивности в кадре). Аналогично, чтобы устранить малоинформативную зависимость критериев от фона, перед расчетом граничного контраста и граничного перепада целесообразно вычитать минимальное значение интенсивности в кадре из значения интенсивности в каждом пикселе кадра. В дальнейшем эта операция всегда применяется при расчете критериев качества.

Выбор ширины внутренней и внешней областей

В работах [1, 2] отмечено, что ширины внутренней и внешней областей, выделенных вдоль границы изображения частицы, должны быть много меньше ее размера. На рис. 3 приведены зависимости критериев качества от ширины областей, выделяемых вдоль границы. В качестве исходного изображения по-прежнему использовались бинарное и голографическое изображения (рис. 1) при фиксированной степени размытия равной 10.

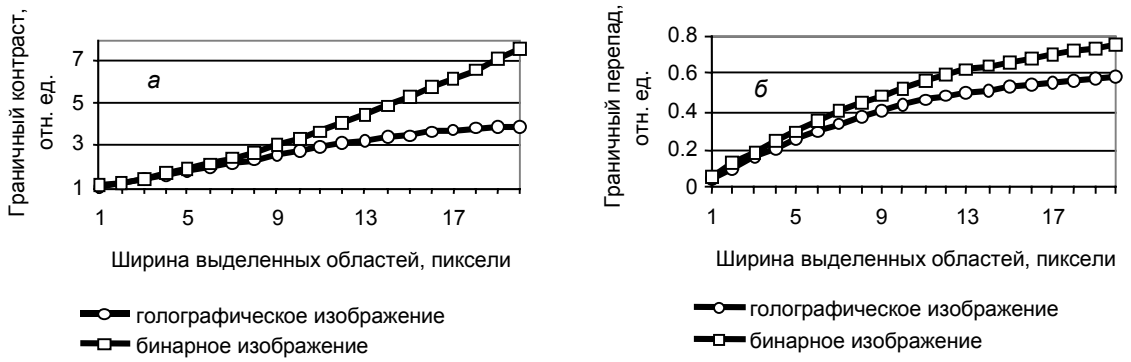

Рис. 3. Зависимости граничного контраста (*а*) и граничного перепада (*б*) от ширины внутренней и внешней областей

Несмотря на то, что малость ширины областей по сравнению с размером частицы выполняется в каждой точке графиков рис. 3, видно, что значения критериев качества существенно зависят от абсолютного значения ширины выделяемых областей. Поэтому предложено использовать малую по сравнению с размерами всех исследуемых в конкретном эксперименте частиц, но фиксированную по абсолютному значению ширину областей. Для апробации такого подхода выполнен численный эксперимент с бинарными изображениями круглых частиц с диметрами 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 и 200 пикселей. Для каждого изображения строилась зависимость значений критериев качества от количества итераций сглаживающего фильтра. Ширина внешней и внутренней областей выбрана равной 2 пикселям в соответствии со сформулированными выше принципами.

Результаты численных расчётов представлены на рис. 4 одной кривой, так как при фиксировании абсолютного значения ширины выделяемых областей зависимости критериев качества от

степени размытия границы для частиц всех рассматриваемых размеров совпадают в пределах погрешности ±1,5 % для граничного контраста и ±2,5 % для граничного перепада.

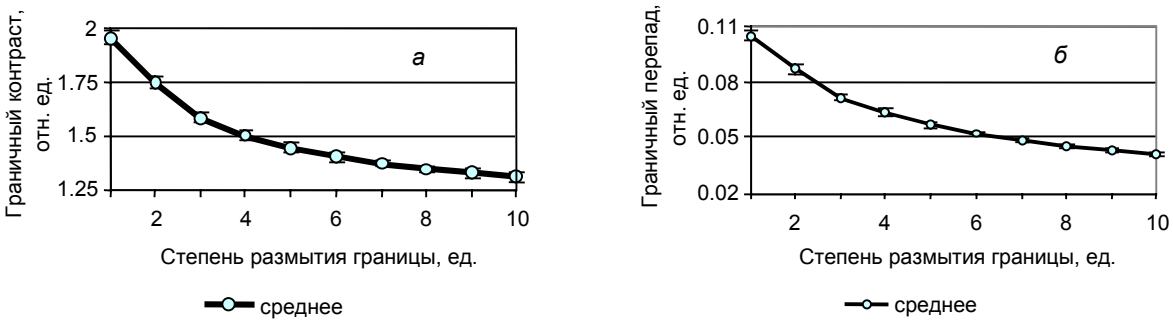

Рис. 4. Зависимости граничного контраста (*а*) и граничного перепада (*б*) от степени размытия границы для изображений частиц различных размеров

В дальнейшем будут использоваться сформулированные выше принципы выбора ширины внутренней и внешней областей. Отметим, что целесообразно также выражать ширину областей не в пикселях, а в единицах длины, чтобы исключить влияние масштабирования изображения (изменения размера пикселя при некоторых алгоритмах восстановления голографического изображения) на значения критериев качества.

Так, например, при цифровом голографировании частиц размером более 200 мкм, что соответствует большинству практических ситуаций, для использования критериев качества ширину внутренней и внешней области целесообразно выбрать равной 14,8 мкм. Такая ширина соответствует сформулированным выше принципам, а также размеру двух пикселей ПЗС-камеры «Видеоскан-2020», используемой в экспериментах настоящей работы.

Очевидно, что и необходимые значения критериев качества, оцененные в работе [1], также необходимо уточнить с учетом сформулированных принципов выбора ширины областей и с применением предварительного вычитания минимального значения интенсивности в кадре из интенсивности в каждом пикселе.

Уточнение необходимых количественных значений критериев качества

Для уточнения необходимых значений критериев качества при заданной выше ширине выделяемых областей (14,8 мкм) численно и экспериментально регистрировались и восстанавливались цифровые голограммы непрозрачных модельных частиц различной формы – площадью 40 000 мкм^2. В численных экспериментах расстояния регистрации голограмм варьировались в диапазоне от 200 до 800 мм с шагом 50 мм, в лабораторных экспериментах – в диапазоне от 120 до 570 мм с шагом 25 мм. В экспериментах по регистрации цифровых голограмм исследуемые частицы находились в воздухе. В качестве источника оптического излучения использовался He–Ne-лазер (длина волны 0,633 мкм). Голограммы регистрировались при помощи ПЗС-камеры «Видеоскан-2020».

Для каждого восстановленного изображения рассчитывались значения длины границы, площади частицы, граничного контраста и граничного перепада. (Последние рассчитывались с учетом сформулированных принципов выбора ширины областей и с применением предварительного вычитания минимального значения интенсивности в кадре из интенсивности в каждом пикселе.) Так же как в работе [1], под изображением частиц приемлемого качества будем понимать такое изображение, в котором отличие формы (т.е. одновременное отличие длины границы и площади) голографического изображения частицы от формы оригинала не более чем на 5 %.

Проведенные численные расчеты показали, что, исходя из приведенного выше условия, приемлемыми по качеству следует считать изображения, граничный контраст которых выше 2,38, граничный перепад выше 0,41, экспериментальные результаты дали значения 1,91 и 0,24 соответственно. Для того чтобы гарантировать выполнение условия «совпадения форм», рассчитанные значения критериев качества целесообразно ужесточить на 5–10 %, например до удобных для использования значений 2,50; 0,45; 2,00 и 0,25 соответственно (таблица). Необходимые (пороговые) значения критериев отличаются для численного и физического эксперимента из-за естественного

отличия качества соответствующих голографических изображений. Например, в изображениях, восстановленных с реальных голограмм, присутствуют шумы и спеклы, значительно ухудшающие их качество.

Уточненные необходимые (пороговые) значения критериев качества для изображений, восстановленных с реальных и численно рассчитанных голограмм при ширине выделяемых областей 15 мкм

Тип изображения	Рассчитанные пороговые значения		Установленные пороговые значения	
	Контраст	Перепад	Контраст	Перепад
Изображение, восстановленное с численно рассчитанной голограммы	2,38	0,41	2,50	0,45
Изображение, восстановленное с реальной голограммы	1,91	0,24	2,00	0,25

Отметим, что, за счет использования вышеобоснованных принципов выбора ширины областей и применения предварительного вычитания минимального значения интенсивности в кадре из интенсивности в каждом пикселе, полученные результаты действительно уточняют пороговые значения, оцененные в численных расчетах работы [1]: 1,85 для граничного контраста и 0,185 для граничного перепада – и ужесточенные для удобства до 2 и 0,2 в работе [3].

Устойчивость значений критериев качества к смещению положения границы

Граничный контраст и граничный перепад характеризуют крутизну границы и, естественно, зависят от того, насколько точно она выделена. В связи с этим необходимо исследовать устойчивость критериев качества к возможным ошибкам определения границы. Ошибки могут быть связаны с погрешностью определения плоскости наилучшей фокусировки частицы или с выбранным порогом бинаризации для использования «метода жука». И то и другое приводит к пропорциональному сужению или расширению изображения частицы. Для исследования устойчивости выполнен численный эксперимент на бинарных изображениях круглой частицы, при расчёте качества которых граница смещалась на задаваемое количество пикселей вовнутрь изображения частицы (отрицательное смещение) или наружу (положительное смещение), по отношению к истинному положению границы.

Критерии качества рассчитывались с выполнением всех вышеописанных условий. Кроме смещения границы использовалось ее размытие путем применения сглаживающего фильтра. Зависимости критериев качества от положения границы для частиц диаметром 30, 100 и 200 пикселей при использовании сглаживающего фильтра 1, 5 и 10 раз (f1, f5, f10) представлены на рис. 5.

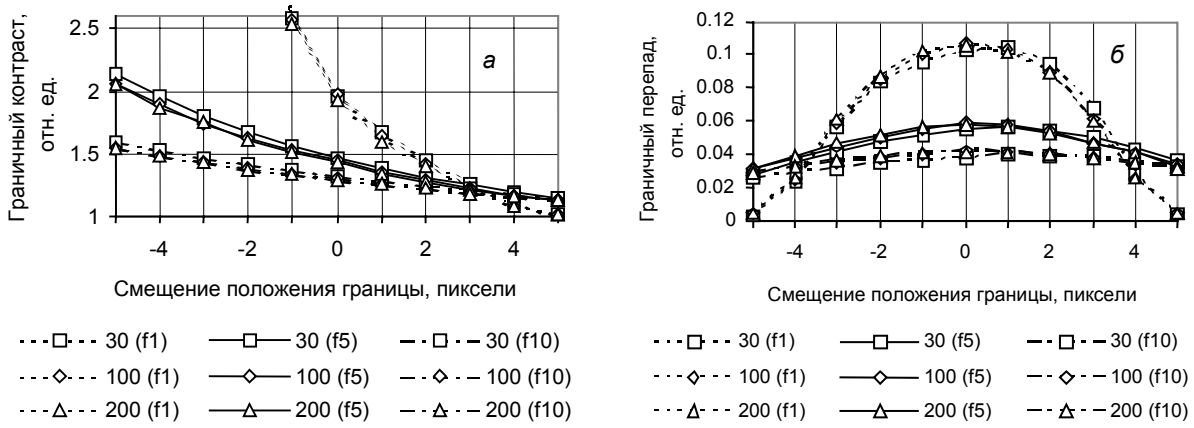

Рис. 5. Зависимости граничного контраста (*а*) и граничного перепада (*б*) от смещения положения границы для частиц различных размеров и различной степени размытия границы

Из рис. 5 видно, что незначительное смещение положения границы не изменяет существенно значение граничного перепада, а его максимальное значение соответствует истинному положению границы. Это означает, что при выделении границы методом жука с предварительной обработкой и бинаризацией изображения порог бинаризации можно оптимизировать по максимальному значению граничного перепада. Граничный контраст существенно менее устойчив к изменению положения границы, используемой для его расчёта, поэтому можно предположить возможность использования резкого изменения крутизны кривых граничного контраста (рис. 5, *а*) для грубой оценки положения границы. Результаты, приведенные на рис. 5, очередной раз подтверждают рациональность совместного использования критериев.

Заключение

В работе детально исследованы предложенные ранее критерии качества голографических изображений как для бинарного (тестового) изображения круглой непрозрачной частицы, так и для ее изображения, восстановленного с цифровой голограммы в реальном лабораторном эксперименте. Подтверждена рациональность совместного использования критериев для изображений с заранее неизвестным контрастом границы. При определенных параметрах изображений (с четкой или нечеткой границей, характером зашумления, наличием фоновой составляющей и т.д.) возможно использование одного из критериев. Чтобы устранить малоинформативную зависимость критериев от фона, перед расчетом граничного контраста и граничного перепада целесообразно вычитать минимальное значение интенсивности в кадре из значения интенсивности в каждом пикселе кадра.

Обосновано и экспериментально подтверждено использование малой по сравнению с размерами всех исследуемых в конкретном эксперименте частиц, но фиксированной по абсолютному значению ширины областей, выделенных вдоль границы частицы. С учетом сформулированных принципов выбора ширины областей и с применением предварительного вычитания минимального значения интенсивности в кадре из интенсивности в каждом пикселе уточнены пороговые значения критериев качества, соответствующие удовлетворительному качеству голографического изображения частицы. Изображением удовлетворительного качества, восстановленным с численно рассчитанной голограммы, следует считать изображение, граничный контраст которого более 2,5, граничный перепад более 0,45, при ширине выделенных областей 14,8 мкм. Для изображений, восстановленных с реальных голограмм, требуемые (пороговые) значения критериев равны 2,0 и 0,25 соответственно. Исследована устойчивость критериев качества к погрешностям определения границы изображения частицы. Показано, что устойчивым критерием является граничный контраст. Предположено, что граничный контраст может быть использован для грубой, а граничный перепад – для точной оценки точности определения границы изображения частицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин В.В., Каменев Д.В. // Изв. вузов. Физика. –2010. – Т. 53. – № 9. – С. 46–53.
2. Демин В.В., Каменев Д.В. // Оптический журнал. – 2012. – Т. 79. –№ 4. – С. 17–21.
3. Демин В.В., Каменев Д.В. // Сб. трудов Междунар. конф. и семинаров. Санкт-Петербург, 18–22 октября 2010 г. / под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – СПб., 2010. – С. 87–90.

Национальный исследовательский
Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: dyomin@mail.tsu.ru, kamenev87@sibmail.com

Поступила в редакцию 15.06.12.

Дёмин Виктор Валентинович, к.ф.-м.н., доцент;
Каменев Денис Вадимович, аспирант, мл. науч. сотр.