

КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ ЧАСТИЦ

© 2012 г. В. В. Демин, канд. физ.-мат. наук; Д. В. Каменев, аспирант

Томский государственный университет, Томск

E-mail: dyomin@mail.tsu.ru

В работе рассмотрены количественные критерии качества восстановленных голографических изображений частиц – “граничный контраст” и “граничный перепад”. Приведены результаты экспериментальных исследований зависимостей этих критериев от уровня аддитивного шума в восстановленном изображении, а также от числа уровней квантования матрицы ПЗС при регистрации голограммы. Показана возможность использования критериев для уточнения положения плоскости наилучшей фокусировки изображения при восстановлении.

Ключевые слова: цифровая голография частиц, критерии качества голографических изображений, граничный контраст, граничный перепад, плоскость наилучшей фокусировки при восстановлении.

Коды OCIS: 090.1995, 100.2000, 100.2960

Поступила в редакцию 03.10.2011

Введение

Одним из применений голографии является бесконтактное определение параметров частиц (размеры, форма, координаты), взвешенных в газовой или жидкой среде. Подобные задачи актуальны при исследовании аэрозолей в атмосферной оптике [1, 2], двухфазных потоков [3], планктона [4–6] и др. В настоящее время для решения этих задач наиболее распространены методы цифровой голографии [4–7], при этом определение плоскости наилучшей фокусировки восстановленного голографического изображения и оценка качества изображения частицы, как правило, осуществляется оператором визуально.

Для объективного определения плоскости наилучшего восстановления, а также для сравнения различных алгоритмов восстановления изображения и фильтрации шумов, оценки глубины сцены для камер с заданными параметрами, необходимы количественные критерии качества голографического изображения частиц. Отметим, что в большинстве традиционно используемых критериев (средняя разность, нормированная корреляция, среднеквадратичная погрешность, норма Минковского, отношение сигнал/шум, резкость границы

и проч.) для оценки качества изображения его сравнивают с идеальным изображением (или непосредственно с объектом). В рассматриваемом случае такой подход неприменим, так как в распоряжении экспериментатора имеется только изображение, восстановленное с голограммы.

Влияние аддитивного шума в восстановленном изображении

В работе [8] авторами статьи предложены следующие критерии качества: средний контраст изображения на границе с фоном (отношение средних интенсивностей изображения и фона в заданных областях вдоль границы изображения частицы, далее – граничный контраст) и средний перепад интенсивности на границе с фоном (нормированная разность указанных средних интенсивностей, далее – граничный перепад), а также проведено предварительное численное тестирование этих критериев на бинарных изображениях модельных частиц различных форм. Показано, что наиболее приемлемым критерием качества является граничный контраст, так как он имеет высокую чувствительность и к размытию границы, и к зашумленности изображения.

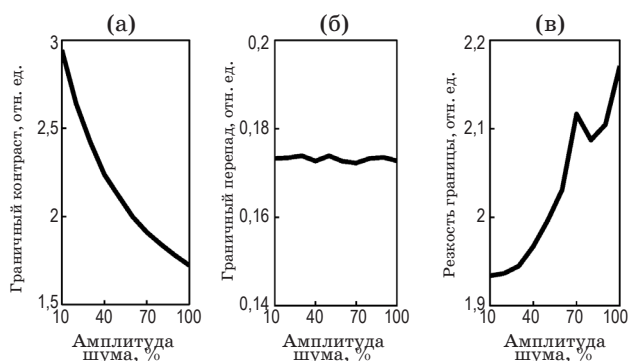


Рис. 1. Зависимости критериев качества (а – граничный контраст, б – граничный перепад, в – резкость границы) от амплитуды равномерно распределенного шума.

Эксперименты, проведенные в настоящей работе, позволили уточнить этот вывод и утверждать, что при контролируемом ухудшении качества изображения путем аддитивного наложения равномерно распределенного шума граничный контраст существенно уменьшается (рис. 1а), граничный перепад практически не изменяется (рис. 1б), в то время как традиционно применяемый критерий резкости границы даже увеличивается (рис. 1в), что не соответствует реальному ухудшению качества изображения. Амплитуда шума на рис. 1 указана в процентах к максимальной интенсивности в кадре.

Вместе с тем эксперименты показывают, что граничный перепад менее зависим от абсолютных значений интенсивности изображения частицы и фона, что указывает на целесообразность совместного применения двух введенных критериев (контраста и перепада).

Примеры использования критериев качества

Ранее, в работе [8] с использованием введенных критериев качества путем численного моделирования записи цифровых осевых голограмм проведена оценка допустимого расстояния от плоскости регистрации голограммы до объектной плоскости для частиц различной формы с одинаковой площадью сечения. Одним из результатов этих экспериментов является предположение, что начиная с некоторых расстояний, при восстановлении голографических изображений теряется информация о частицах (или деталях) определенных форм.

В настоящей работе путем аналогичного численного эксперимента проведена оценка влияния разрядности цифровой камеры с матрицей ПЗС, используемой для записи голограмм, на качество восстановленных изображений. Показано, что при использовании 10-разрядной камеры для регистрации голограмм частиц различных форм (круг, квадрат, прямоугольник, треугольник и проч.) с одинаковой площадью сечения $40\ 000\ \mu\text{м}^2$ на расстояниях от 200 до 500 мм граничный перепад восстановленных изображений ухудшается не более чем на 0,01%, а граничный контраст – не более чем на 0,1% по отношению к случаю регистрации не квантованной голограммы. При использовании 8-разрядной камеры – на 6% и 15% соответственно. При дальнейшем уменьшении разрядности камеры качество изображения продолжает ухудшаться, что указывает на необходимость использования в цифровой голографии камер с разрядностью не менее 10. Очевидно, что это связано с характером распределения интенсивности, регистрируемой на матрицу ПЗС при записи осевой голограммы частицы. Так, например, огибающая картины интерференции опорной и предметной волн при записи осевой голограммы круглой частицы характеризуется большими перепадами центральных и боковых максимумов. При этом чем выше разрядность матрицы, тем точнее можно зарегистрировать слабые боковые лепестки распределения и тем точнее восстановить форму частицы.

Чтобы оценить применимость используемых критериев качества для определения плоскости наилучшей фокусировки (ПНФ) восстановленных голографических изображений частиц, проведен эксперимент по регистрации цифровых голограмм модельных круглых непрозрачных частиц диаметром 500 мкм, что составляет 70 пикселей используемой камеры ПЗС “Видеоскан 2020”. Для регистрации голограмм использовался непрерывный твердотельный лазер с длиной волны излучения 532 нм.

Модельные частицы представляли собой непрозрачные экраны, нанесенные на стеклянную пластину, что позволило измерить расстояние от частицы до плоскости регистрации голограммы. В данном эксперименте это расстояние составляло 156 мм.

На рис. 2 изображены цифровая голограмма, изображения частиц, восстановленные на расстояниях 155, 156,2, 156,3, 157 мм, а так-

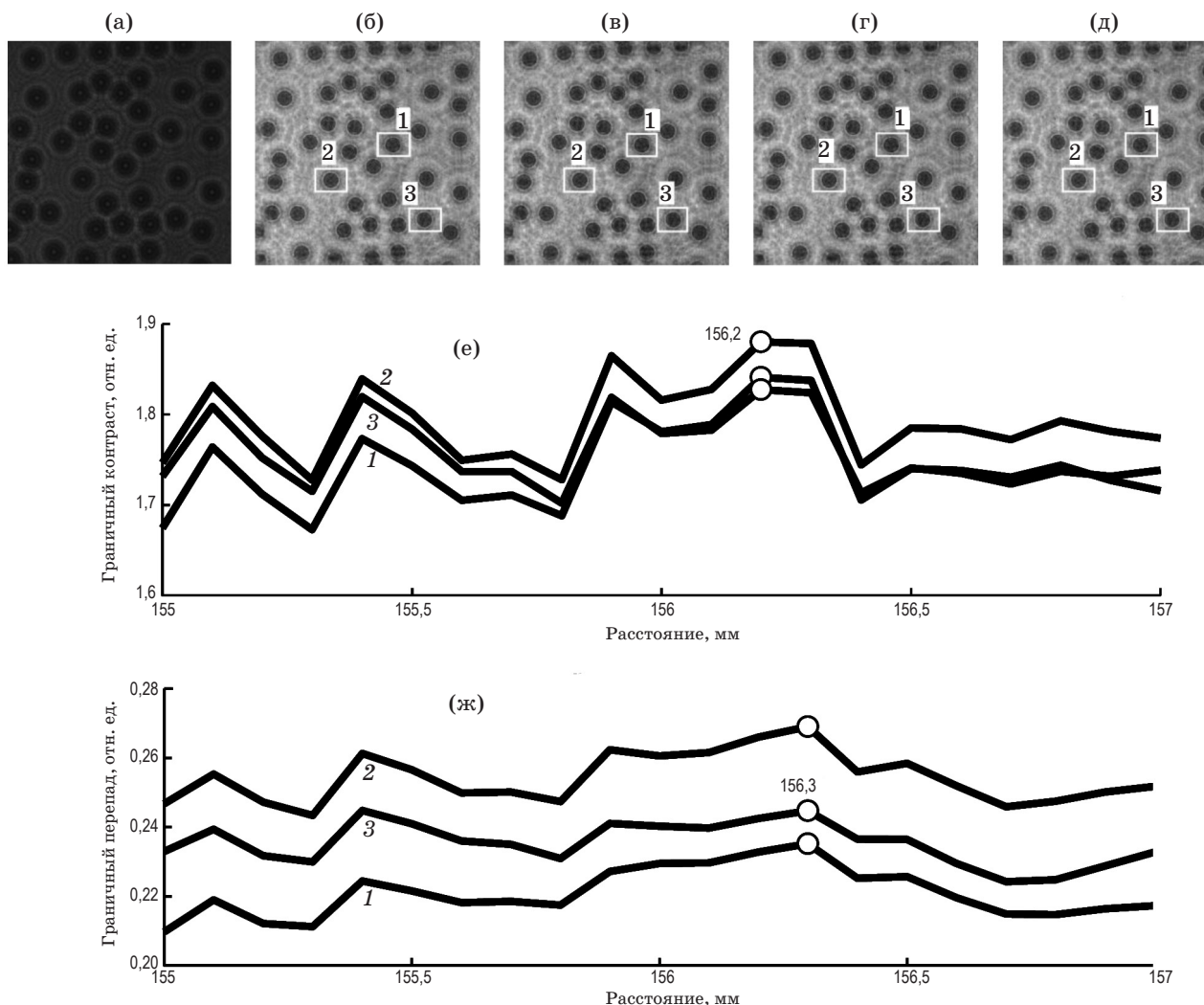


Рис. 2. Определение ПНФ голографических изображений непрозрачных круглых частиц, а – цифровая голограмма, б, в, г, д – голографические изображения частиц, восстановленные на расстояниях 155, 156,2, 156,3, 157 мм соответственно, зависимости граничного контраста (е) и граничного перепада (ж) от расстояния восстановления для частиц, обозначенных цифрами 1, 2, 3.

же зависимости граничного контраста и перепада от расстояния восстановления для частиц, обозначенных на рисунке цифрами 1, 2, 3. По изображениям (рис. 2б, в, г, д) практически невозможно визуально определить ПНФ. Тем не менее, во многих задачах положение частицы необходимо определять с высокой точностью, сравнимой по порядку величины с размером частицы.

Приведенные на рис. 2е, ж графики позволяют уточнить положение ПНФ по максимальному значению граничного контраста или перепада. Несовпадение с реальным положением частицы на этапе регистрации голограммы составляет 0,2 мм для граничного контраста и 0,3 мм для граничного перепада, что в боль-

шинстве практических задач соответствует приемлемой точности. Отметим также, что несмотря на тот факт, что графики для частиц 1, 2, 3 отличаются по абсолютным значениям, в то же время их вид и положение максимума (ПНФ) для разных частиц совпадают, что подчеркивает устойчивость и эффективность используемых критериев качества для определения ПНФ.

Наиболее сложно определить ПНФ при регистрации объемных частиц достаточно большого размера, например, планктонных особей. В этом случае определение координат частиц является нетривиальной задачей, поэтому в работе [7], например, поперечные координаты предлагается находить по положению центра

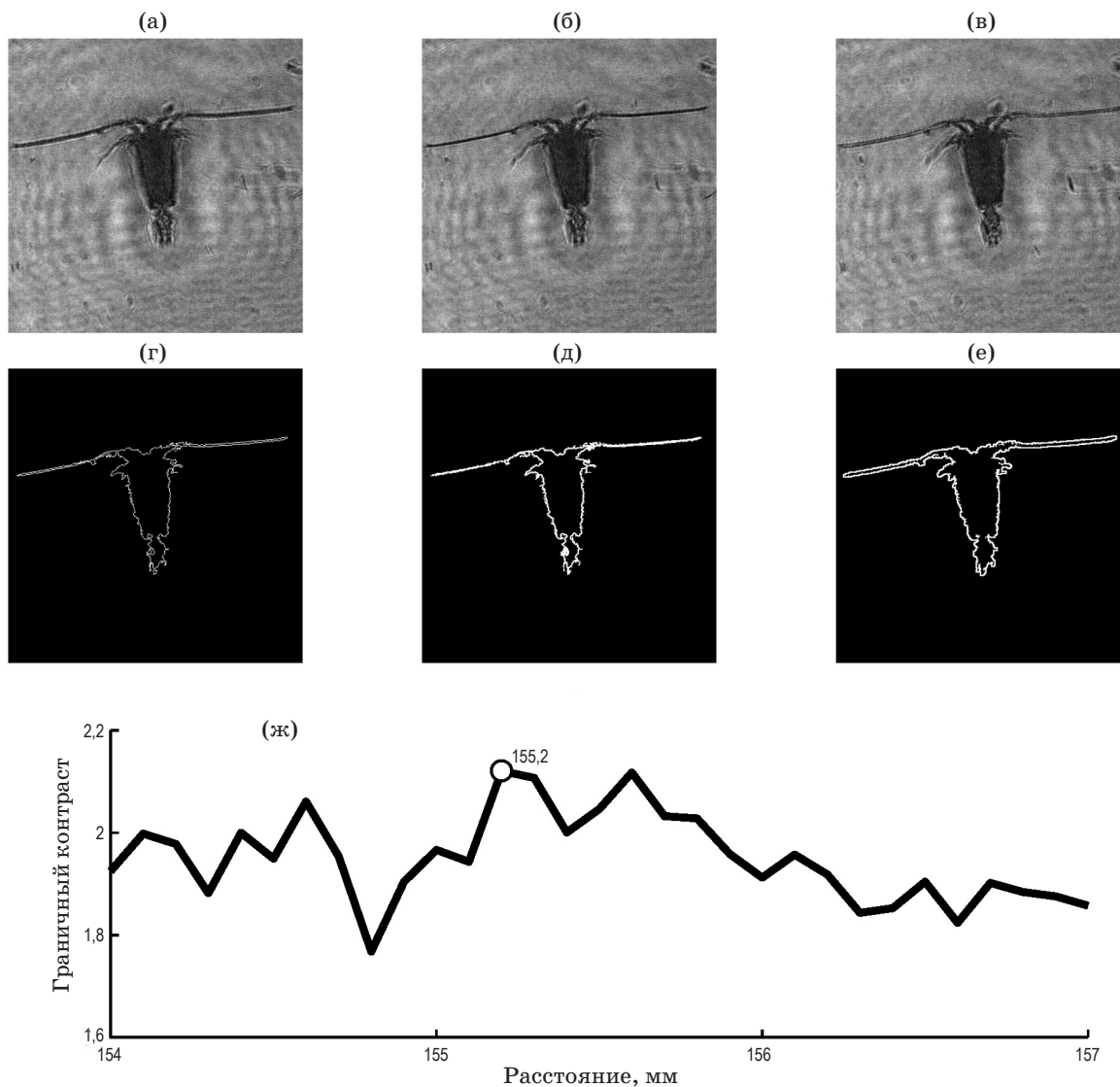


Рис. 3. Определение ПНФ голографического изображения планктонной особи (*Epischura baicalensis*). а, б, в – голографические изображения планктонной особи, расстояния восстановления 154, 155,2, 157 мм соответственно, г, д, е – примеры границы, внутренней и внешней областей, ширина выделенных областей 2 пиксела, ж – зависимость граничного контраста от расстояния восстановления.

тяжести изображения частицы, а продольную – визуальным выбором ПНФ. В настоящей работе положение ПНФ для изображений планктона предлагается, так же как в предыдущем эксперименте, определять по максимуму введенных критериев качества.

На рис. 3а–в приведены голографические изображения планктонной особи (*Epischura baicalensis*) при расстояниях восстановления 154, 155,2, 157 мм. Запись цифровой голограммы осуществлялась по осевой схеме, камера “Видеоскан 2020”, He-Ne лазер (длина волны 632,8 нм). Так же, как в предыдущем случае, при визуальном контроле по кадрам

рис. 3а–в невозможно определить ПНФ. В то же время совместное использование введенных критериев качества (зависимость граничного контраста от расстояния восстановления, рис. 3ж) позволяет определить ПНФ на расстоянии восстановления 155,2 мм. На рис. 3г–е проиллюстрированы примеры выделяемых для этого границы, внутренней и внешней областей, соответственно (выделение внутренней и внешней полос описано в работе [8]). Отметим, что в связи с малыми размерами деталей частицы ширина внутренней и внешней полос выбрана равной 2 пиксела.

Заклучение

Результаты моделирования и экспериментов показывают, что использование предложенных критериев позволяет определить плоскость наилучшей фокусировки восстановленных голографических изображений частиц, а также обосновать требования к разрядности

камеры ПЗС при записи цифровых голограмм частиц.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы”, государственный контракт П1736, а также в рамках программы АВЦП проект № 2.1.1/13333.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Демин В.В., Степанов С.Г. Исследование ориентационных характеристик модельных кристаллических аэрозолей голографическим методом // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 9. С. 833–836.
Переводной вариант статьи
Dyomin V.V., Stepanov S.G. Study of Orientation Characteristics of Model Crystalline Aerosols by Holographic Method // Atmospheric and Oceanic Optics. 2000. V. 13. № 9. P. 773–776.
2. Fugal J.P., Shaw R.A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // Atmos. Meas. Tech. 2009. № 2. P. 259–271.
3. Шорин В.П., Журавлев О.А., Логак Л.Г., Мединская Л.Н., Федосов А.И. Голографическая установка для изучения двухфазных потоков // Приборы и техника эксперимента. 1985. № 5. С. 158–161.
4. Pfitsch D.W., Malkiel E., Ronzhes Y., King S.R., Sheng J., Katz J. Development of a free-drifting submersible digital holographic imaging system // Proc. MTS/IEEE OCEANS. 2005. P. 690–696.
5. Sun H., Hendry D.C., Player M.A., Watson J. In situ underwater electronic holographic camera for studies of plankton // IEEE J. Ocean. Eng. 2007. V. 32. P. 373–382.
6. Демин В.В., Ольшукhov А.С., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г. Цифровая голография планктона // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 12. С. 1089–1095.
Переводной вариант статьи
Dyomin V.V., Olshukov A.S., Naumova E.Yu., Melnik N.G. Digital Holography of Plankton // Atmospheric and Oceanic Optics. 2008. V. 21. № 12. P. 951–956.
7. Демин В.В., Ольшукhov А.С., Дзюба Е.В. Цифровое голографическое видео для исследования динамики планктона // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 8. С. 81–89.
Переводной вариант статьи
Dyomin V.V., Olshukov A.S., Dzyuba E.V. Digital Holographic Video for Studies of Plankton Dynamics // Russian Physics Journal. 2011. V. 53. № 8. P. 857–866.
8. Демин В.В., Каменев Д.В. Критерии качества голографических изображений частиц различной формы // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 9. С. 46–53.
Переводной вариант статьи
Dyomin V.V., Kamenev D.V. Quality Criteria for Holographic Images of Particles of Various Shapes // Russian Physics Journal. 2011. V. 53. № 9. P. 927–935.