

**КОНФЕРЕНЦИЯ В**

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ  
В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ**

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Давыдова А.Ю.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

e-mail: starinshikova@mail.ru

В работе рассмотрены искажения, вносимые влиянием волн, распространяющихся от мнимого изображения, на действительное изображение частицы, восстановленной с осевой цифровой голограммы (двойниковое изображение), и спекл-шумом. Показано, что искажения, вносимые двойниковым изображением, понижают качество изображения на 13-75 % по граничному перепаду. Спекл-шумы оказывают соизмеримое влияние на качество изображения. Приведенные численные эксперименты позволяют определить условие регистрации цифровых голограмм, при которых зашумленное изображение пригодно для определения характеристик частиц.

Цифровая голография является одними из перспективных методов исследования взвешенных частиц, в частности планктона в среде его обитания [1]. Цифровая голограмма содержит информацию обо всем зарегистрированном объеме с планктоном, а численное восстановление цифровой голограммы позволяет автоматизировать процесс определения размеров и форм [2, 3], положения в пространстве [3] каждой особи планктона, содержащейся в объеме при регистрации, а также произвести их распознавание и классификацию [2, 4]. При восстановлении цифровой голограммы в изображениях присутствуют искажения (шумы), снижающие качество восстановленных изображений и затрудняющие процесс определения характеристик исследуемых частиц и их классификацию. К числу наиболее значимых относятся аддитивные шумы, вносимые влиянием волн, распространяющихся от мнимого изображения, на действительное изображение частицы, восстановленной с осевой голограммы (двойниковое изображение) [5, 6], и шумы когерентности или спекл-шум [7]. Двойниковое изображение — обязательный артефакт осевой цифровой голографии. Для радикального устранения этого эффекта применяется более громоздкая внеосевая схема.

Для моделирования влияния данных искажений на качество изображения частиц произведен численный расчет цифровых голограмм модельной круглой непрозрачной частицы ((1) на рис. 1) (диаметр частицы  $d=198$  мкм (35 пикселей), размер поля изображения  $2048 \times 2048$  пикселей). Цифровые голограммы рассчитаны согласно осевой схеме регистрации голограмм с помощью интеграла Френеля-Кирхгофа [8], при этом длина волны излучения 0,66 мкм, геометрические размеры пикселя  $5,5 \times 5,5$  мкм, расстояние между плоскостью частицы и плоскостью голограммы 50 мм. На рис. 1 (2)-(5) представлены изображения частицы,

восстановленные из численно рассчитанных осевых цифровых голограмм для различных видов анализируемых шумов.

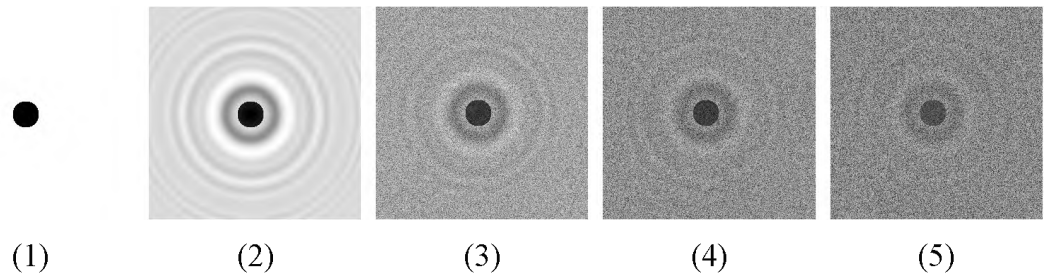


Рисунок 1 — (1) – изображение модельной частицы круглой формы (эталонное изображение), (2) – изображение частицы, восстановленное из численно рассчитанной осевой цифровой голограммы (иллюстрирует двойниковое изображение), (3)-(5) – с наложением равномерно распределенного шума с дисперсий 0,25 (3), 0,5 (4) и 1 (5).

Для оценки влияния шумов на качество изображений частиц используют различные критерии качества изображения [9], наиболее часто используемые это среднеквадратичная ошибка  $MSE$  [10] и пиковое отношение сигнал/шум  $PSNR$  [11]:

$$MSE = \frac{1}{N_i N_j} \sum_{i=0}^{N_i-1} \sum_{j=0}^{N_j-1} (I_S(i, j) - I_N(i, j))^2, \quad (1)$$

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{I_{S \max}}{\sqrt{MSE}} \right), \quad (2)$$

где  $I_S(i, j)$  – интенсивность в точке  $(i, j)$  эталонного изображения размером  $N_i \times N_j$ ,  $I_N(i, j)$  – интенсивность в точке  $(i, j)$  исследуемого изображения с шумами размером  $N_i \times N_j$ ,  $I_{S \max}$  – максимальное значение интенсивности эталонного изображения (с учетом нормировки динамического диапазона  $I_{S \max} = 1$ ). Данные критерии сравнивают исследуемое изображение (с шумами) с эталонным изображением (без шумов). В случае численного расчета цифровой голограммы использование  $MSE$  и  $PSNR$  возможно, т.к. эталонное изображение известно. В ситуации регистрации цифровой голограммы реальных частиц эталонное изображение не известно, и требуются критерии непосредственной оценки качества. Поэтому в данной работе, кроме  $MSE$  и  $PSNR$ , приведен перепад на границе изображения частицы  $P$  [9], определяемый по формуле:

$$P = \langle I_{Nout} \rangle - \langle I_{Nin} \rangle, \quad (3)$$

где  $\langle I_{Nin} \rangle = \sum_{i=0}^m I_i / m$  – средняя интенсивность внутренней области на границе,  $\langle I_{Nout} \rangle = \sum_{i=0}^n I_i / n$  – средняя интенсивность внешней области на границе,  $m$ ,  $n$  – число пикселей внутренней и

внешней областей соответственно. При расчетах критериев качества интенсивность изображений нормируется к динамическому диапазону от 0 до 1.

Значения критериев качества изображений, представленных на рис. 1, указаны на графике рис. 2. При совпадении исследуемого изображения с эталонным  $MSE=0$ ,  $P=1$  (на рис. 2 точки, с координатой (1) по оси абсцисс), а значение  $PSNR=\infty$  (точка не отмечена на графике). Приведенные оценки показывают, что искажения, вносимые двойниковым изображением, понижают качество изображения на 33% по граничному перепаду, что соизмеримо с влиянием спекл-шума (23-43% в зависимости от дисперсии шума). Этот вывод подтверждает положение о том, что в условиях когерентных шумов связанных со средой (многократное рассеяние, турбулентность, седиментирующие частицы) нет большого смысла использовать внеосевую схему голографирования.

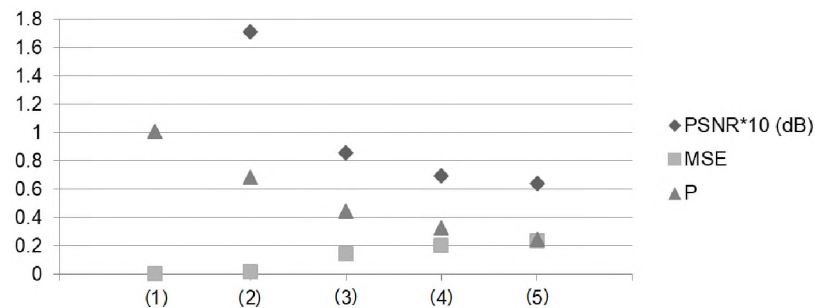


Рисунок 2 — Значения критериев качества для изображений на рис. 1.

Исследована зависимость критериев качества восстановленного изображения модельной частицы от расстояния  $z$  между плоскостью частицы и плоскостью голограммы на этапе численного расчета голограммы и ее восстановления (рис. 3). Из графика видно, что значение граничного перепада больше 0,25 (приемлемое качество [9]) в диапазоне расстояний от 2 до 138 мм.

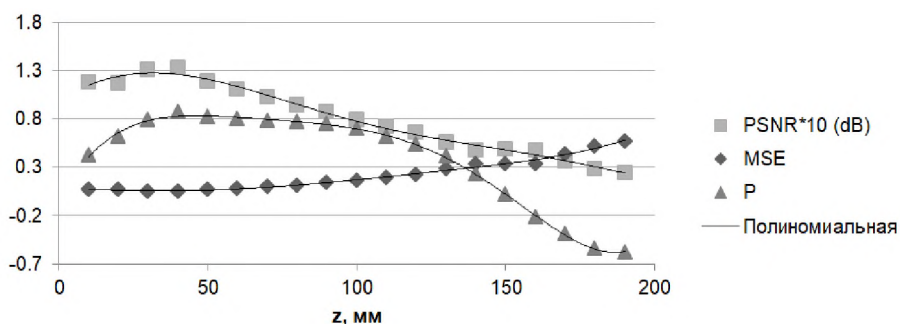


Рисунок 3 — Зависимость критериев качества от расстояния между плоскостью частицы и плоскостью голограммы на этапе численного расчета голограммы и ее восстановления.

Сплошная линия – аппроксимация полиномом 6-ой степени.

Приведенные численные эксперименты позволяют определить условие регистрации цифровых голограмм (расстояния между плоскостью частицы и плоскостью голограммы при заданных длине волны и размера частицы), при которых зашумленное изображение пригодно для определения характеристик частиц. В противном случае, необходимо применять методы подавления изучаемых шумов [5, 6, 12].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90233.

1. Lombard F., Boss E., Waite A.M., Vogt M., Uitz J., Stemmann L., Sosik H.M., Schulz J., Romagnan J.-B., Picheral M., Pearlman J., Ohman M.D., Niehoff B., Möller K.O., Miloslavich P., Lara-Lpez A., Kudela R., Lopes R.M., Kiko R., Karp-Boss L., Jaffe J.S., Iversen M.H., Irisson J.-O., Fennel K., Hauss H., Guidi L., Gorsky G., Giering S.L.C., Gaube P., Gallagher S., Dubelaar G., Cowen R.K., Carlotti F., Briseño-Avena C., Berline L., Benoit-Bird K., Bax N., Batten S., Ayata S.D., Artigas L.F., Appeltans W. Globally Consistent Quantitative Observations of Planktonic Ecosystems // *Front. Mar. Sci.* 2019. V. 6, Article 196. P. 1–21.

2. Dyomin V., Olshukov A., Davydova A. Data acquisition from digital holograms of particles: Proceedings // *Unconventional Optical Imaging*. Strasbourg, France, May, 2018. Proc. SPIE, 2018. V. 10677, Article 106773B. P. 1–14.

3. Dyomin V.V., Kamenev D.V. Evaluation of Algorithms for Automatic Data Extraction from Digital Holographic Images of Particles // *Russian Physics Journal*. 2016. V. 58, № 10. P. 1467–1474.

4. Dyomin V.V., Polovtsev I.G., Davydova A.Y. Fast recognition of marine particles in underwater digital holography: Proceedings // *23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. Irkutsk, Russian Federation, November, 2017. Proc. SPIE, 2017. V. 10466, Article 1046627. P. 1–4.

5. Демин В.В., Стариницкова А.Ю. Методы уменьшения взаимного влияния мнимого и действительного изображений в цифровой голографии частиц // *Известия ВУЗов. Физика*. 2010. № 9/3. С. 42–45.

6. Denis L., Fournier C., Fournel T., Ducottet C. Numerical suppression of the twin image in in-line holography of a volume of micro-objects // *Meas. Sci. Technol.* 2008. V. 19, № 7. P. 1–19.

7. Гуревич С.Б., Константинов В.Б., Соколов В.К., Черных Д.Ф. Передача и обработка информации голографическими методами. М.: Сов. радио, 1978. 304 с.

8. Tyler G.A., Thompson B.J. Fraunhofer Holography Applied to Particle Size Analysis a Reassessment // *Journal of Modern Optics*. 1976. V. 23, № 9. P. 685–700.

9. Каменев Д.В. Качество голографических изображений частиц различной формы в цифровой голографии: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ. Томск, 2013. 22 с.

10. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.

11. Choi H.J., Seo Y.H., Kim D.W. Noise reduction for digital holograms in a discrete cosine transform (DCT) domain // *Opt. Appl.* 2010. V. 40, № 4. P. 991–1005.

12. Picart P. Appraisal and performance of noise reduction in digital holographic imaging: материалы школы-симпозиума // XXXI Международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике. Екатеринбург, 2019. Екб: УрФУ им. Б.Н.Ельцина, 2019. С 11.