

УДК 535.8 004.932.4

## ИТЕРАТИВНАЯ БИНАРИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ДИФФУЗИИ ОШИБКИ

© Е. А. Курбатова, В. Г. Родин, П. А. Черёмхин

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
115409, Москва, Каширское шоссе, 31  
E-mail: PAcheremkhin@mephi.ru*

Бинаризация цифровых голограмм используется для хранения и оперативной передачи зарегистрированной информации, а также для оптического восстановления изображений с использованием бинарных микрзеркальных модуляторов света. Рассмотрены возможности бинаризации оптически зарегистрированных голограмм итеративными методами с применением операции диффузии ошибки на каждом шаге изменения порога бинаризации или только на финальной итерации. Проведены анализ варьирования параметров методов и сравнение качества восстановленных изображений с бинаризованных голограмм. Определено, что метод с применением операции диффузии ошибки только на финальной итерации повышает качество восстановления изображений на 12 % по сравнению с одношаговыми методами.

*Ключевые слова:* цифровая голография, бинаризация, диффузия ошибки, итеративный метод.

DOI: 10.15372/AUT20200213

**Введение.** Бинаризация цифровых и компьютерно-синтезированных голограмм применяется в различных практических приложениях, таких как голографические дисплеи [1], оптическое преобразование информации [2], задачи корреляционного распознавания изображений [3, 4], сжатие и хранение информации [5, 6] и т. д. Использование бинарных голограмм при оптическом восстановлении изображений с помощью микрзеркальных модуляторов позволяет получить высокие скорости отображения кадров (десятки тысяч Гц [7]), значительно превышающие случай с другим популярным типом модуляторов — жидкокристаллическим [7].

Наиболее распространёнными способами бинаризации изображений и численно-синтезированных голограмм являются локальная и глобальная пороговые обработки [8, 9], а также применение процедуры диффузии ошибки [10–13] и различных итеративных методов [14]. В случае оптически записанных цифровых голограмм практически не было работ по сравнению возможностей бинаризации различными методами. Однако было показано, что при использовании некоторых методов бинаризации по порогу [15] и одношаговой процедуры диффузии ошибки [16] достигается высокое качество восстановленных изображений.

Процедура диффузии ошибки заключается в последовательном сравнении каждого пикселя изображения с некоторым пороговым значением. Если значение яркости пикселя больше порогового значения, то пикселю присваивается значение 1, если меньше — 0. Для каждого пикселя сохраняется разница между значением яркости данного пикселя и пороговым значением, называемая ошибкой, которая может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Это значение ошибки распространяется среди соседних к рассматриваемому пикселю с некоторыми значениями весовых коэффициентов, т. е. к значениям яркости соседних пикселей добавляется значение, равное произведению ошибки и соответствующего весового коэффициента. Обычно последовательный перебор пикселей

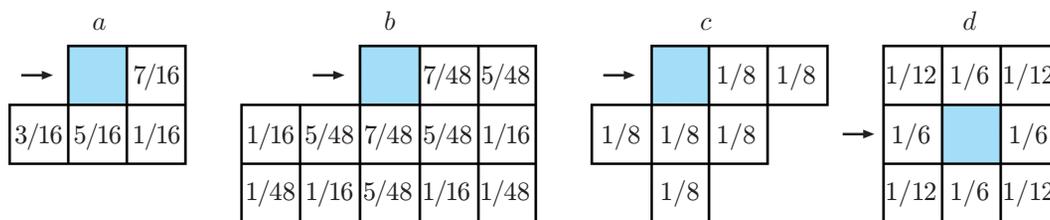


Рис. 1. Примеры матриц весовых коэффициентов для методов диффузии ошибки: Флойда — Стенберга (a), Джарвиса (b), Аткинсона (c) и метода точечной диффузии Кната (d)

происходит из левого верхнего угла изображения в правый нижний по строкам, т. е. сначала последовательно обрабатываются пиксели первой строки (слева направо), затем второй и т. д. Значения ранее рассмотренных пикселей, уже имеющих значения 0 или 1, остаются неизменными. В результате осуществления процедуры диффузии ошибки все пиксели изображения принимают значения 0 или 1.

Методы диффузии ошибки можно разделить на 2 группы: стандартные (классические) [10, 17, 18] и точечные [19, 20]. Стандартные варианты диффузии ошибки различаются значениями весовых коэффициентов, количеством соседних с рассматриваемым пикселей, участвующих в процессе диффузии ошибки, направлением и порядком обхода пикселей в изображении и т. д. Наиболее распространён метод диффузии ошибки Флойда — Стенберга [10]. Его пороговое значение, с которым проводится сравнение значений яркости пикселей, составляет половину максимальной, направление обхода пикселей прямое построчное, а матрица коэффициентов распределения значений ошибки между соседними пикселями представлена на рис. 1, a. Матрицы весовых коэффициентов для других распространённых методов диффузии ошибки (Джарвиса [17] и Аткинсона [18]) показаны на рис. 1, b, c. Распределение ошибки методов точечной диффузии проводится среди всех восьми соседних с рассматриваемым пикселей, включая уже пройденные [19, 20]. Пример матрицы весовых коэффициентов метода точечной диффузии ошибки — метода Кната [20] — приведён на рис. 1, d.

Для повышения качества восстановления изображений с бинаризованных цифровых голограмм методами диффузии ошибки возможно применение дополнительных процедур, например различных направлений обхода пикселей голограммы [18] или адаптивного к объекту выбора весовых коэффициентов [13]. В данной работе дополнительно повысить качество восстановления предлагается за счёт возможностей итеративных методов бинаризации в сочетании с операцией диффузии ошибки. Рассмотрены методы с итеративным изменением порога бинаризации и диффузией ошибки на каждом шаге, а также на последнем шаге. Целью данной работы было исследование возможностей применения этих методов для повышения качества восстановления изображений с бинаризованных цифровых голограмм.

**Применение операции диффузии ошибки с итеративным изменением порога бинаризации.** Метод итеративного изменения порога бинаризации с процедурой диффузии ошибки во время каждой итерации (далее метод № 1) можно представить в следующем виде. Вначале задаётся диапазон пороговых значений, а также количество шагов бинаризации (количество итераций). При выполнении первой итерации метода значения яркости пикселей голограммы сравниваются с максимальным и минимальным значениями порога. Все пиксели, не попадающие в указанный диапазон и имеющие значение менее минимального и более максимального пороговых значений, заменяются нулевыми и единичными значениями соответственно, а также проводится процедура диффузии ошибки

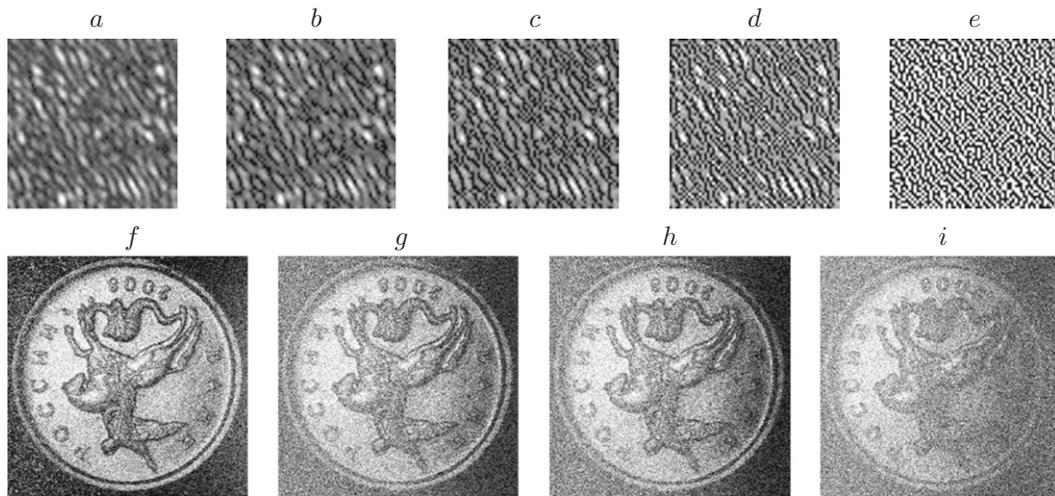


Рис. 2. Фрагменты цифровой голограммы ( $64 \times 64$  пикселя) и восстановленные изображения: исходная голограмма (a), полученные в процессе бинаризации методом № 1 после 1 (b), 2 (c), 3 (d) и финальной 4 (e) итераций, и восстановленные изображения с исходной голограммы (f) и с бинаризованных для 1 (g), 4 (h) и 10 (i) итераций изменения порога

для данных пикселей. Остальные значения яркости остаются первоначальными. Во время следующей итерации метода происходит изменение пороговых значений бинаризации на определённую величину, учитывающую диапазон изменения пороговых значений и количество итераций. Далее осуществляется процедура, аналогичная проводимой при первой итерации метода с учётом изменения минимального и максимального пороговых значений. Таким образом, процедура продолжается до тех пор, пока значения верхнего и нижнего порогов не сравняются. За счёт плавного изменения порогов бинаризации должен происходить более корректный учёт особенностей распределения яркости пикселей изображений.

Для реализации метода № 1 использованы матрицы распространения весовых коэффициентов Флойда — Стенберга [10], Джарвиса [17], Аткинсона [18] и точечной диффузии Кната [20]. Оценка качества восстанавливаемых изображений с бинаризованных цифровых голограмм проводилась как визуально, так и с помощью таких количественных параметров, как пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ) [21] и индекс структурного сходства (ИСС) [22]. Бинаризовались цифровые голограммы Френеля объектов различных типов: отражающих и пропускающих, практически плоских и трёхмерных [15, 23]. Расстояния от объектов сцен до плоскости фотосенсора камеры составляло от 0,4 до 1,5 м. Восстановление изображений с зарегистрированных голограмм в исходном и бинаризованном виде производилось с использованием метода прямого расчёта дифракции Френеля [24].

На рис. 2, a—e представлены фрагменты исходной цифровой голограммы размером  $64 \times 64$  пикселя и полученных голограмм в процессе бинаризации методом № 1 с использованием матрицы Флойда — Стенберга. Показаны случаи после каждой итерации (общее количество итераций 4), поэтому фрагменты на рис. 2, b—d имеют больше двух градаций яркости. На рис. 2, f—i приведены примеры восстановленных изображений объекта с исходной и бинаризованной голограмм с помощью матрицы Флойда — Стенберга.

На рис. 3 показаны графики зависимостей качества восстановления изображений с бинаризованных голограмм от используемого количества итераций. Почти для всех итераций качество восстановления не повышается с увеличением их числа. Это может быть связано со сложностью структуры оптически регистрируемых цифровых голограмм в от-

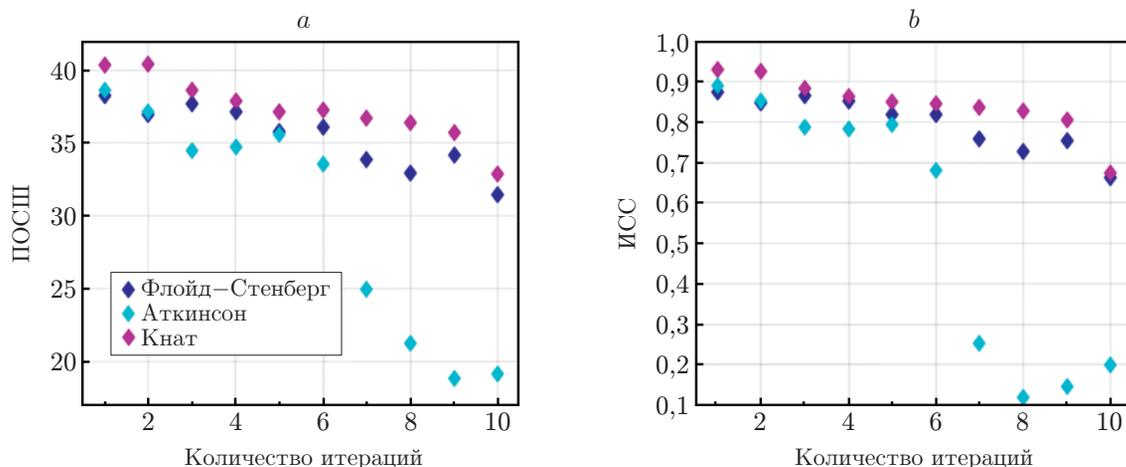


Рис. 3. Графики зависимостей значений качества восстановленных изображений с бинаризованных методом № 1 голограмм от числа итераций: ПОСШ (a) и ИСС (b)

личие от более равномерной структуры классических фотоизображений и более структурированного распределения яркостей по численно синтезированным голограммам, а также с повторным распространением ошибки по уже бинаризованным пикселям, что приводит к накоплению значений ошибки. Как видно на рис. 3, например, для матрицы Кната с 2 итерациями и для матрицы Флойда — Стенберга с 3 итерациями наблюдается небольшое улучшение качества восстановления. Однако среднее улучшение качества, полученное в ходе экспериментов, составило не более 1 % по метрикам качества.

Результаты типичны для всех цифровых голограмм различного вида объектов. При этом за счёт многократного повторения итерационной процедуры и операции диффузии ошибки ресурсоёмкость метода повышается пропорционально числу итераций. Таким образом, данный вариант итеративных методов с операцией диффузии ошибки не даёт значительных результатов в задаче бинаризации оптически регистрируемых цифровых голограмм.

**Применение операции диффузии ошибки с итеративным изменением порога бинаризации и процедурой диффузии ошибки во время последней итерации.** Вторым рассмотренным подходом является процедура итеративного изменения порога бинаризации и применения диффузии ошибки только во время последней итерации алгоритма (метод № 2). Аналогично методу № 1 перед итерационными процедурами задаются диапазон пороговых значений и количество итераций метода. Во время каждой итерации, кроме последней, происходит изменение пороговых значений бинаризации и значения яркости пикселей голограммы, не попадающие в диапазон значений между максимальным и минимальным значениями порога, бинаризируются. Для каждого пикселя голограммы вычисляется разница исходного значения яркости пикселя и присвоенного ему значения (1 или 0). Данное значение ошибки сохраняется для каждого пикселя с учётом коэффициента, пропорционального номеру итерации и обратно пропорционального заданному количеству итераций. Однако процедура диффузии ошибки для этих пикселей не проводится, а выполняется только во время последней итерации, когда пороговые значения сходятся к середине диапазона. Таким образом, данная реализация метода позволяет избежать случайного повторного накопления ошибки, как в методе № 1.

Для реализации метода № 2 использовались различные стандартные матрицы весовых коэффициентов, примеры которых представлены на рис. 1. Фрагменты исходной цифровой

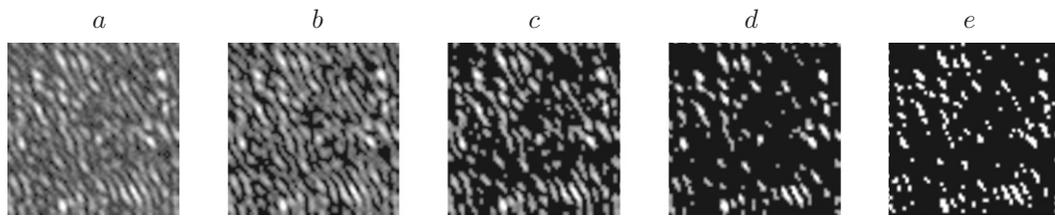


Рис. 4. Фрагменты цифровой голограммы: исходной (а) и полученных в процессе бинаризации методом № 2 после 1 (b), 2 (c), 3 (d) и финальной 4 (e) итераций

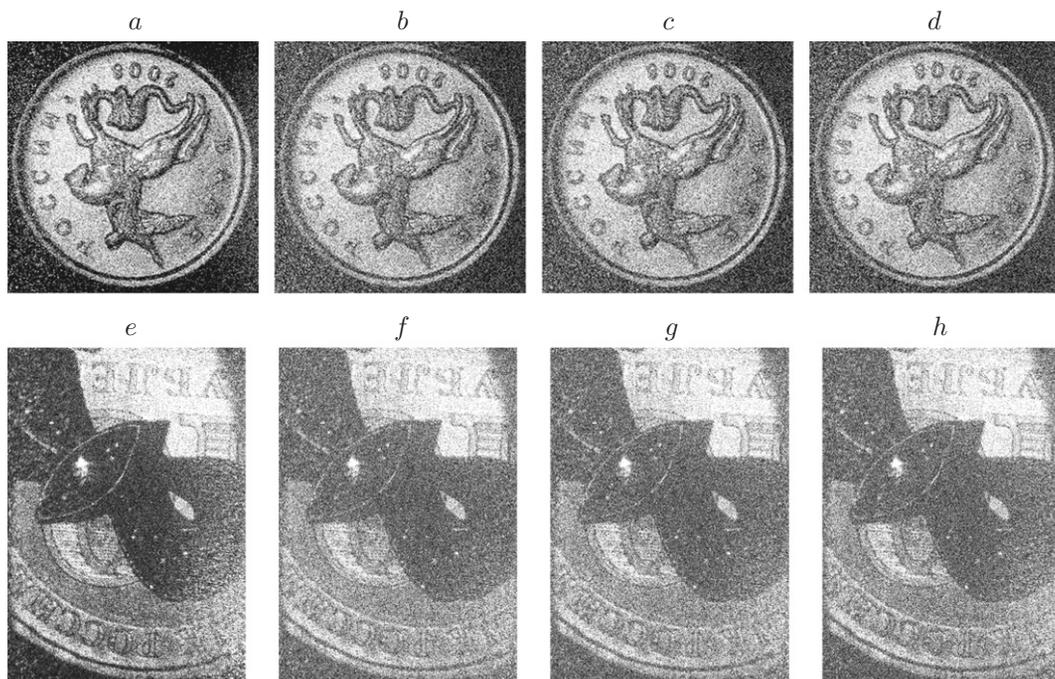


Рис. 5. Восстановленные изображения: с исходных голограмм (а, е) и бинаризованных методом № 2 с матрицей Аткинсона для случаев 1 (b, f), 2 (c, g), 4 (d, h) итераций изменения порога

голограммы размером  $64 \times 64$  пикселя и полученных голограмм в процессе бинаризации после каждой итерации представлены на рис. 4. На последнем (4-м) шаге алгоритма при выполнении процедуры диффузии ошибки использована матрица Джарвиса. Аналогично фрагментам, представленным на рис. 2,  $b-d$ , рис. 4,  $b-d$  демонстрирует промежуточные стадии метода бинаризации и имеет более двух градаций яркости. Как видно, итоговый результат бинаризации голограммы (рис. 4, e) содержит меньшее количество накопленных случайных ошибок, чем в случае, представленном на рис. 2, e, поэтому качество восстановления должно быть выше.

Примеры восстановленных изображений с бинаризованных голограмм при использовании матрицы Аткинсона показаны на рис. 5. Случай 1-й итерации (рис. 5, b, f) соответствует реализации стандартного метода диффузии ошибки с такой же матрицей весовых коэффициентов. При увеличении числа итераций повышается контрастность элементов восстановленных изображений. Графики зависимостей качества восстановления с бинаризованных голограмм от используемого числа итераций показаны на рис. 6.

Как видно, применение метода позволило повысить качество до 12 % по сравнению со случаем стандартной диффузии ошибки (т. е. случаем 1-й итерации). Качество повышается уже при 2 итерациях, а близких к максимуму значений оно достигает при использовании

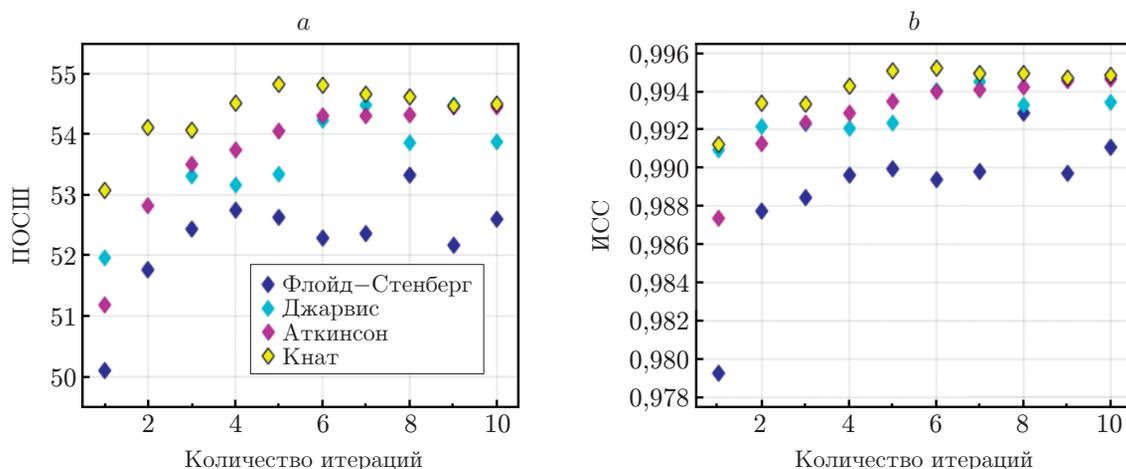


Рис. 6. Графики зависимостей значений качества восстановленных изображений с бинаризованных методом № 2 голограмм от числа итераций: ПОСШ (а) и ИСС (b)

4-й и 5-й итераций.

Результаты являются типичными и были получены для всех цифровых голограмм различного вида объектов. За счёт того, что самым ресурсоёмким этапом метода является последний шаг (из-за операции диффузии ошибки), повышение числа итераций не так существенно влияет на скорость расчётов, как в случае метода № 1. Таким образом, данный вариант итеративных методов с операцией диффузии ошибки следует использовать для бинаризации цифровых голограмм.

**Заключение.** Для задачи бинаризации оптически зарегистрированных цифровых голограмм рассмотрены два варианта итеративных методов с использованием операции диффузии ошибки с изменением порога бинаризации: диффузия ошибки проводится в пределах каждой итерации или только во время последней. Выполнена оценка качества восстановленных изображений с применением различных матриц весовых коэффициентов распространения ошибки, а также получена оценка влияния числа итераций на качество восстановления.

Использование метода с итеративным изменением порога бинаризации и диффузией ошибки на каждой итерации не является целесообразным в случае цифровых голограмм и даёт возможность улучшить качество не более чем на 1 %. Применение метода с диффузией ошибки на последнем этапе позволяет существенно повысить качество восстановления изображений (по величинам метрик качества до 12 %). При этом оказывается достаточно всего 2–5 итераций, которые не приведут к значительному увеличению ресурсоёмкости метода.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-79-00277).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lim Y., Hong K., Kim H. et al. 360-degree tabletop electronic holographic display // Opt. Express. 2016. **24**, Iss. 22. P. 24999–25009.
2. Jiao S., Zhou C., Shi Y. et al. Review on optical image hiding and watermarking techniques // Opt. Laser Technol. 2019. **109**. P. 370–380.

3. **Evtikhiev N. N., Starikov S. N., Shaulskiy D. V. et al.** Invariant correlation filter with linear phase coefficient holographic realization in 4-F correlator // *Opt. Eng.* 2011. **50**, N 6. 065803.
4. **Molodtsov D. Yu., Rodin V. G.** Object recognition in non-coherent optical correlator based on DMD-modulator // *Proc. SPIE.* 2017. **10176**. 101761A. DOI: 10.1117/12.2268159.
5. **Mills G. A., Yamaguchi I.** Effects of quantization in phase-shifting digital holography // *Appl. Opt.* 2005. **44**, Iss. 7. P. 1216–1225.
6. **Cheremkhin P. A., Kurbatova E. A.** Wavelet compression of off-axis digital holograms using real/imaginary and amplitude/phase parts // *Sci. Rep.* 2019. **9**, Iss. 1. 7561. DOI: 10.1038/s41598-019-44119-0.
7. **Компанец И. Н., Андреев А. Л.** Микродисплеи в системах пространственной модуляции света // *Квантовая электроника.* 2017. **47**, № 4. С. 294–302.
8. **Sezgin M., Sankur B.** Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation // *Journ. Electron. Imaging.* 2004. **13**, Iss. 1. P. 146–168.
9. **Tsang P. W. M.** A comparison of several methods for generation of binary holograms of three dimensional (3D) scenes // *3D Research.* 2012. **3**, Iss. 4. P. 1–6.
10. **Floyd R. W., Steinberg L.** An adaptive algorithm for spatial grey scale // *Proc. Soc. Inf. Disp.* 1976. **17**, Iss. 2. P. 75–77.
11. **Eschbach R.** Comparison of error diffusion methods for computer-generated holograms // *Appl. Opt.* 1991. **30**, Iss. 26. P. 3702–3710.
12. **Matsumoto Y., Takaki Y.** Improvement of gray-scale representation of horizontally scanning holographic display using error diffusion // *Opt. Lett.* 2014. **39**, Iss. 12. P. 3433–3436.
13. **Yang G., Jiao S., Liu J.-P. et al.** Error diffusion method with optimized weighting coefficients for binary hologram generation // *Appl. Opt.* 2019. **58**, Iss. 20. P. 5547–5555.
14. **Zhang E., Noehte S., Dietrich C. H., Männer R.** Gradual and random binarization of gray-scale holograms // *Appl. Opt.* 1995. **34**, Iss 26. P. 5987–5995.
15. **Cheremkhin P. A., Kurbatova E. A.** Comparative appraisal of global and local thresholding methods for binarisation of off-axis digital holograms // *Opt. Lasers Eng.* 2019. **115**. P. 119–130. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.11.019.
16. **Cheremkhin P. A., Kurbatova E. A.** Binarization of digital holograms by thresholding and error diffusion techniques // *Proc. of the Meeting Congress on Digital Holography and 3-D Imaging (OSA Technical Digest).* Bordeaux, France, 19-23 May, 2019. Th3A.22. DOI: 10.1364/DH.2019.Th3A.22.
17. **Jarvis J. F., Judice C. N., Ninke W. H.** A survey of techniques for the display of continuous tone pictures on bi-level displays // *Comput. Graph. Image Process.* 1976. **5**, Iss. 1. P. 13–40.
18. **Seckar J., Pokorny P.** Relation of statistical information and visual quality in halftone images // *Annals of DAAAM and Proc. of the XXI Intern. DAAAM Symp. «Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Interdisciplinary Solutions».* Zadar, Croatia, 20–23 Oct., 2010. P. 1419–1420.
19. **Guo J. M., Liu Y. F.** Improved dot diffusion by diffused matrix and class matrix co-optimization // *IEEE Trans. Image Process.* 2009. **18**, N 8. P. 1804–1816.
20. **Knuth D. E.** Digital Halftones by Dot Diffusion // *ACM Trans. Graph.* 1987. **6**, N 4. P. 245–273.
21. **Huynh-Thu Q., Ghanbari M.** Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment // *Electron. Lett.* 2008. **44**, Iss. 13. P. 800–801.
22. **Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P.** Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // *IEEE Trans. Image Process.* 2004. **13**, Iss. 4. P. 600–612.

- 
23. **Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al.** Demonstration of digital hologram recording and 3D-scenes reconstruction in real-time // Proc. SPIE. 2016. **9889**. 98891M. DOI: 10.1117/12.2227767.
  24. **Бобринев В. И., Галкин М. Л., Ковалев М. С. и др.** Исследование синтезированных голограмм Френеля для датчиков волнового фронта // Автометрия. 2018. **54**, № 1. С. 31–37. DOI: 10.15372/AUT20180105.

*Поступила в редакцию 22.11.2019*

*После доработки 19.12.2019*

*Принята к публикации 24.12.2019*

---