

## 49. Итеративные методы бинаризации цифровых голограмм с использованием диффузии ошибки

*Е. А. Курбатова, В. Г. Родин, П. А. Черемхин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Для задачи бинаризации цифровых голограмм в работе рассмотрены итеративные методы, использующие процедуру диффузии ошибки. Проведена сравнительная оценка методов по качеству восстановления изображений с бинаризованных голограмм на примере экспериментально зарегистрированных цифровых голограмм. Проведён анализ влияния количества итераций методов на качество восстановления изображений.

*Ключевые слова:* Цифровая голография, Бинаризация голограмм, Диффузия ошибки, Итеративное сжатие голограмм, Микрозеркальный модулятор света.

*Цитирование:* Курбатова, В. Г. Итеративные методы бинаризации цифровых голограмм с использованием диффузии ошибки / Е. А. Курбатова, В. Г. Родин, П. А. Черемхин // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 315–319.

### Введение

В настоящее время наиболее широко распространены два типа пространственно-временных модуляторов света: жидкокристаллические и микрозеркальные. Для многих задач, таких как создание голографических дисплеев [1], оптических корреляторов [2], оптическое кодирование информации [3–4] и др., наиболее применимы высокоскоростные микрозеркальные модуляторы (МЗМ). В силу бинарности модуляции МЗМ для оптического восстановления изображений и 3D-сцен необходимо проводить бинаризацию голограмм.

Для повышения скорости передачи голограмм по каналам связи и снижения требований к объемам архивной памяти, необходимой для их хранения проводится компрессия файлов цифровых голограмм. Данная задача может решаться также с помощью бинаризации голограмм. Наиболее распространенными методами бинаризации являются локальные и глобальные методы бинаризации по порогу [5–6], а также различные реализации метода диффузии ошибки [7–8]. За счет итеративности методов бинаризации можно достичь более высокого качества восстановленных изображений.

В данной работе рассмотрены методы повышения качества восстановления изображений с бинаризованных оптически зарегистрированных голограмм за счёт сочетания итеративных методов бинаризации и операции диффузии ошибки. В работе рассматриваются методы с итеративным изменением порога бинаризации и процедурой диффузии ошибки, применяемой на каждом шаге, а также на последнем шаге.

## **1. Итеративные методы бинаризации голограмм с использованием диффузии ошибки**

Алгоритм метода итеративного изменения порога бинаризации с процедурой диффузии ошибки во время каждой итерации (метод № 1) состоит из следующих шагов [9]:

1. Задаются диапазон пороговых значений и количество шагов бинаризации (количество итераций).

2. Значения яркости каждого пикселя голограммы сравниваются с максимальным и минимальным пороговыми значениями. Пиксели со значениями яркости менее минимального и более максимального значения порога приобретают значения «0» и «1», соответственно, для каждого пикселя проводится процедура диффузии ошибки.

3. Пороговые значения изменяются в соответствии с заданным количеством итераций и диапазоном пороговых значений.

4. Повторяется шаг №2 с новыми пороговыми значениями.

Шаг №2 является первой итерацией данного метода. Шаги №3 и 4 повторяются до того момента, когда максимальное и минимальное пороговые значения сравниваются и проводится стандартная процедура диффузии ошибки с данным пороговым значением.

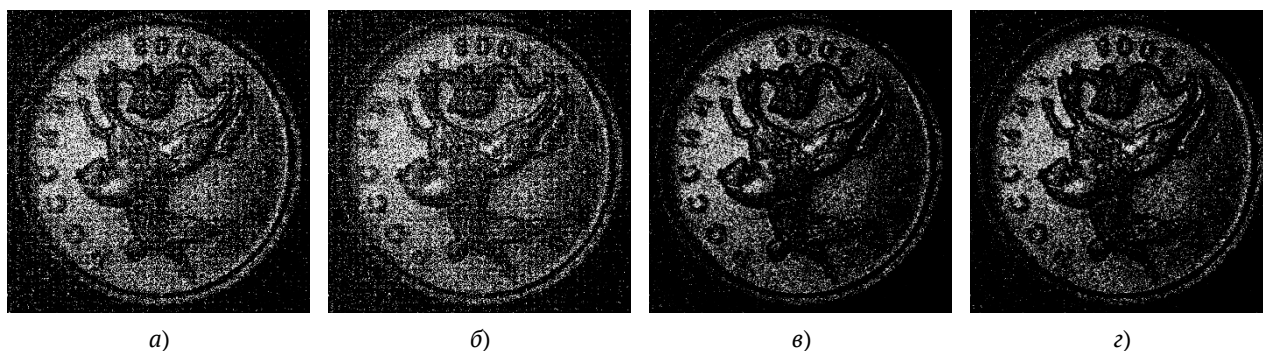
При такой итеративной реализации диффузии ошибки должен происходить более корректный учёт особенностей распределения яркости пикселей голограммы, чем при стандартной бинаризацией методом диффузии ошибки за счет плавного изменения порогового значения.

Вторым рассмотренным вариантом реализации итеративного метода диффузии ошибки является процедура итеративного изменения порога бинаризации и применения диффузии ошибки только во время последней итерации алгоритма (метод №2) [9]. Алгоритм данного метода аналогичен алгоритму метода №1, однако при проведении шагов №2 и 4 процедура диффузии ошибки не проводится. Вместо этого для каждого пикселя голограммы вычисляется разница исходного значения яркости пикселя и присвоенного ему значения («1» или «0»). Для каждого пикселя данное значение разницы сохраняется с коэффициентом, равным отношению номера итерации и заданного количества итераций. Процедура диффузии ошибки проводится только при проведении последней итерации с учетом всех накопленных значений ошибки.

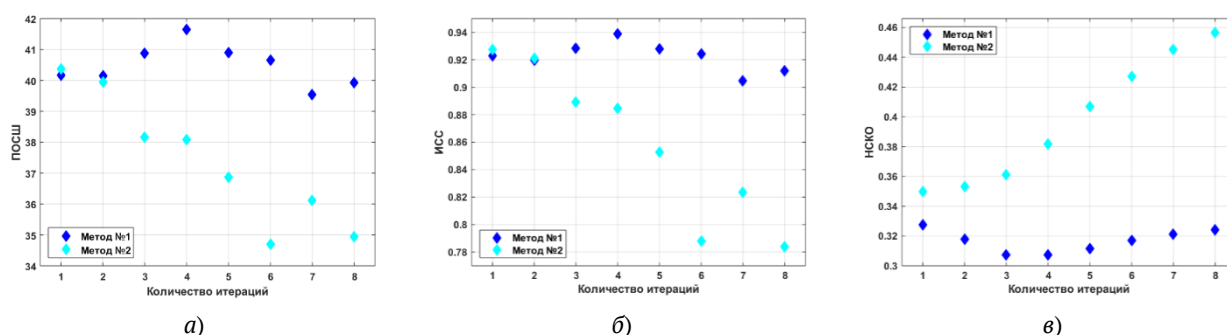
Таким образом, однократное проведение диффузии ошибки позволяет избежать случайного повторного накопления ошибки как в методе №1.

## **2. Результаты восстановления изображений с голограмм, бинаризованных итеративными методами диффузии ошибки**

Для бинаризации экспериментально записанных голограмм 3D-объектов использовались описанные Методы №1 и 2 с использованием матриц распространения весовых коэффициентов Флойда-Стенберга [7], Джарвиса [10], Аткинсона [11] и точечной диффузии Кната [12]. Расстояния от объектов сцен до плоскости фотосенсора камеры составляло от 0,4 до 1,5 м.



**Рис. 1.** Примеры восстановленных изображений с экспериментально записанной цифровой голограммы, бинаризованной Методами № 1 (а, б) и № 2 (в, з) при использовании матрицы Джарвиса в случае 2 (а, в) и 4 (б, з) итераций



**Рис. 2.** Зависимости величин оценки качества восстановления изображений с бинаризованных цифровых голограмм Методами № 1 и 2 в случае использования матрицы весовых коэффициентов Аткинсона от количества итераций

Восстановление изображений с зарегистрированных голограмм в исходном и бинаризованном виде производилось с использованием метода прямого расчёта дифракции Френеля.

Была проведена сравнительная оценка реализованных методов по качеству восстановленных с бинаризованных голограмм изображений и влияния количества итераций на качество восстановления.

На рисунке 1 представлены примеры восстановленных изображений объемной сцены с голограмм, бинаризованных Методами № 1 (а, б) и 2 (в, г) в случае 2 (а, в) и 4 (б, г) итераций соответственно при использовании матрицы весовых коэффициентов Джарвиса. На рисунке 2 представлены зависимости пикового отношения сигнал/шум (ПОСШ), нормированного среднеквадратического отклонения восстановленных с исходной полутоновой и с бинаризованной голограммы изображений (НСКО) и индекса структурного сходства (ИСС) для Методов № 1 и 2 в случае использования матрицы весовых коэффициентов Аткинсона от количества итераций.

Как видно, использование метода с итеративным изменением порога бинаризации и диффузией ошибки на каждой итерации позволяет повысить качество восстановленных изображений лишь на 0,1 % при 2 итерациях метода, дальнейшее повышение количества ите-

раций приводит к ухудшению качества при значительном повышении ресурсоемкости метода и, соответственно, не является целесообразным в случае сжатия оптически зарегистрированных цифровых голограмм.

Применение метода с диффузией ошибки только на последнем этапе позволяет повысить качество восстановления изображений до 12%, для чего достаточно всего 2–5 итераций. При этом не происходит существенного увеличения вычислительной ресурсоемкости метода.

### Заключение

В данной работе был проведен сравнительный анализ двух итеративных методов бинаризации голограмм на основе применения процедуры диффузии ошибки: при каждой итерации и только во время последней. Представлены примеры восстановленных изображений с голограмм, бинаризованных данными методами.

Применение диффузии ошибки на каждой итерации приводит к случайному повторному накоплению ошибки и не способствует повышению качества восстановления. Итеративное изменение порога с процедурой диффузии ошибки на последней итерации позволяет повысить качество восстановления до 12%.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 18-79-00277.

### Список источников

- [1] **Pan, Y.** A review of dynamic holographic three-dimensional display: algorithms, devices, and systems / Y. Pan, J. Liu, X. Li, Y. Wang // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. — 2016. — Vol. 12. — P. 1599–1610.
- [2] **Molodtsov, D. Yu.** Object recognition in non-coherent optical correlator based on DMD-modulator / D. Yu. Molodtsov, V. G. Rodin // *Proc of SPIE*. — 2016. — Vol. 10176. — P. 101761A.
- [3] **Jiao S.** Review on optical image hiding and watermarking techniques / S. Jiao, C. Zhou, Y. Shi, W. Zou, X. Li // *Optics & Laser Technology*. — 2019. — Vol. 109. — P. 370–380.
- [4] **Евтихийев, Н. Н.** Оптическое кодирование QR-кодов в схеме с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрозеркальных модуляторов света / Н. Н. Евтихийев, В. В. Краснов, И. Д. Кузьмин, Д. Ю. Молодцов, В. Г. Родин, Р. С. Стариков, П. А. Черемхин // *Квантовая электроника*. — 2020. — Том 50. — №2. — С. 195–196.
- [5] **Gonzalez, R. C.** Thresholding. *Digital image processing* / R. C. Gonzalez, R. E. Woods; 4th ed. New York: Pearson, 2018.
- [6] **Cheremkhin, P. A.** Comparative appraisal of global and local thresholding methods for binarisation of off-axis digital holograms / P. A. Cheremkhin, E. A. Kurbatova // *Optics and Lasers in Engineering*. — 2019. — Vol. 115. — P. 119–130.
- [7] **Floyd, R. W.** An adaptive algorithm for spatial grey scale / R. W. Floyd, L. Steinberg // *Proceedings of the Society of Information Display*. — 1976. — Vol. 17. — P. 75–77.
- [8] **Eschbach, R.** Comparison of error diffusion methods for computer-generated holograms / R. Eschbach // *Applied Optics*. — 1991. — Vol. 30. — P. 3702–3710.

- [9] **Курбатова, Е. А.** Итеративная бинаризация цифровых голограмм с применением метода диффузии ошибки / Е. А. Курбатова, В. Г. Родин, П. А. Черемхин // Автометрия. — 2020. — Том 56. — №2. — С. 118–125.
- [10] **Jarvis, J. F.** A survey of techniques for the display of continuous tone pictures on bi-level displays / J. F. Jarvis, C. N. Judice, W. H. Ninke // Computer Graphics and Image Processing. — 1976. — Vol. 5. — Iss. 1. — P. 13–40.
- [11] **Seckar, J.** Relation of statistical information and visual quality in halftone images / J. Seckar, P. Pokorny // 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.
- [12] **Knuth, D. E.** Digital Halftones by Dot Diffusion / D. E. Knuth // ACM Transcripts on Graphics. — 1987. — Vol. 6. — №4. — P. 245–273.