

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В ПСЕВДОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ КОДАХ

Баринова Д.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет,
Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

В этой статье исследуются два метода псевдоголографического кодирования: «регулярный» и «стохастический». Приведены результаты сравнительного анализа этих преобразований, применительно к задаче восстановления изображений при потере части информации. Предложен метод вставки электронного водяного знака в цифровое изображение для регулярного метода псевдоголографического кодирования. Приведены результаты анализа устойчивости водяного знака к «типичным» преобразованиям цифровых изображений. Определены границы применимости регулярного метода псевдоголографического кодирования при решении конкретных прикладных задач.

Введение

Впервые опубликованная в работах [1, 2], идея псевдоголографического кодирования, заключается в том, что отсчеты цифрового двумерного массива (цифрового изображения) переупорядочиваются специальным образом, так что по любой части переупорядоченного массива можно реконструировать уменьшенную копию исходного изображения. Закодированное изображение (псевдоголограмма) имеет «шумоподобный» вид.

Среди преимуществ метода, отметим основные.

Псевдоголографическое представление изображения позволяет, даже при потере некоторого блока информации, восстановить полное изображение, погрешность восстановления при этом будет зависеть от объема потерянной информации, тогда как при обычном методе хранения и передачи изображения потеря блока будет безвозвратной, то есть приведет к утере фрагмента.

Псевдоголографическое представление изображения оказывается эффективным в ситуациях, когда положение информационного блока, пришедшего на вход, оказывается неизвестным, то есть, возможно, восстановление изображения по произвольной части кодирующей подпоследовательности даже при отсутствии информации о положении данной подпоследовательности.

Данный метод кодирования изображения предоставляет возможность последовательного уточнения восстановленного изображения в распределенных сетях. Можно сказать, что пользователь может сам выбирать то соотношение времени и качества, которое его устраивает.

Представление изображения с использованием данного метода таково, что разложение изображения обладает неким декоррелирующим свойством, что позволяет использовать его в задачах фильтрации коррелируемого импульсного шума при передаче данных по зашумленному каналу.

В работе [5] описан другой метод псевдоголографического преобразования. Суть данного метода заключается в следующем. Отсчеты растровой матрицы изображения переупорядочиваются, в результате чего получается также шумоподобное изображение – псевдоголограмма. Однако, в отличие от метода псевдо-

логографического кодирования, описанного в работах [1, 2], переупорядочивание происходит не по определенному, заранее заданному правилу, а с использованием генератора случайных чисел.

Метод псевдоголографического преобразования изображений

Описание регулярного метода псевдоголографического кодирования

Идея метода псевдоголографического представления данных заключается в том, что двумерный массив точек изображения разворачивается в одномерную последовательность по определенному правилу. При этом каждой точке на изображении ставится в соответствие не только пара координат (m, n) – адрес точки в двумерном массиве, но и некоторое число – k , которое и определяет номер данной точки в кодируемой последовательности.

Переупорядочивание отсчетов осуществляется специальным образом по заранее выбранному пользователем правилу. Псевдоголографическое преобразование характеризуется следующими параметрами: p, N .

Пусть исходное изображение имеет размер $p^N \times p^N$, где p – простое число. (Рассмотрим основные положения на примере $p=2$, а $N=8$). Правило нумерации задается произвольно, пример приведен на рис. 1.

0	2
3	1

Рис. 1. Правило нумерации

Обозначим матрицу, изображенную на рис. 1, буквой A . Количество строк и столбцов этой матрицы должно быть одинаковым и равно p . Это соответствует элементарному (наименьшему размеру изображения) изображению $p \times p$.

Дополнительные функции, по которым и будет в дальнейшем определяться нумерация точек определяются формулой (1):

$$\begin{cases} A_x(k) = n, \text{ существует } m: A(m, n) = k, \\ A_y(k) = m, \text{ существует } n: A(m, n) = k. \end{cases} \quad (1)$$

Для заданного значения параметра $p=2$ и правила нумерации дополнительные функции определяются

как показано на рис. 2. Здесь в первой строке перечислены значения k – аргумент функции, а во второй – значения n и m соответственно – значение функции.

$$A_X: \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 1 & 2 & 3 \\ \hline 0 & 1 & 1 & 0 \\ \hline \end{array}$$

$$A_Y: \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 1 & 2 & 3 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Рис. 2. Вид дополнительных функций

Пусть (m, n) – пространственные координаты отсчета на изображении, k – номер данного отсчета в получаемой последовательности $\{h_k\}$, где $k = \overline{1, PN}$ ($PN = p^N \times p^N$).

Начальный уровень нумерации ($N=1$) определяется правилом нумерации, следующие уровни ($N=2$ и $N=3$) имеют вид, представленный на рис. 3а, б.

0	8	2	10
12	4	14	6
3	11	1	9
15	7	13	5

0	32	8	40	2	34	10	42
48	16	56	24	50	18	58	26
12	44	4	36	14	46	6	38
60	28	52	20	62	30	54	22
3	35	11	43	1	33	9	41
51	19	59	27	49	17	57	25
15	47	7	39	13	45	5	37
63	31	55	23	61	29	53	21

а)

б)

Рис. 3. Уровни нумерации

Правило нахождения пространственных координат отсчета (m, n) по его номеру k в кодируемой подпоследовательности определяется по формуле (2):

$$\begin{cases} n = \sum_{i=0}^{N-1} p^{N-1-i} A_X \left(\left[\frac{k}{p^{2^i}} \right] \pmod{p^2} \right), \\ m = \sum_{i=0}^{N-1} p^{N-1-i} A_Y \left(\left[\frac{k}{p^{2^i}} \right] \pmod{p^2} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где $[d]$ означает целую часть числа d .

Правило нахождения номера отсчета k в кодируемой подпоследовательности по его пространственным координатам (m, n) определяется по формулам (3):

$$\begin{cases} k_i = k_{i+1} \cdot p^2 + q(i), \\ q(i) = Q(m_i, n_i, i, p, N), \\ k_{N-1} = A(m, n), \\ i = \overline{0, N-2}; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} m_i = m_{i-1} \pmod{p^{N-i}}, \\ n_i = n_{i-1} \pmod{p^{N-i}}, \\ m_0 = m, \\ n_0 = n, \\ i = \overline{1, N-1}, \end{cases} \quad (3)$$

где $q(i)$ – это номер квадрата, имеющий размер $p^{N-1-i} \times p^{N-1-i}$, в который попал отсчет с пространственными координатами (m, n) на i -ом уровне кодирования; k_0 – значение номера отсчета k в кодируемой последовательности; k_i – промежуточное значение k . Функция $Q(m_i, n_i, i, p, N)$ определяет номер квадрата $q(i)$ по координатам (m_i, n_i) , функциям A_X и A_Y и вычисленным по значениям p, i и N границам квадратов следующего (более высокого) уровня кодирования: в выбранном квадрате с номером $q(i-1)$ определяется положение искомого отсчета. Для этого рассчитывается пара новых «приведенных» координат (m_i, n_i) в заданном квадрате, которые могут принимать значения от 0 до $p^{N-i} - 1$. Далее, сопоставляя таблицы функций A_X и A_Y , получаем $q(i)$ как число, находящееся в матрице A , имеющее координаты (m_i, n_i) . Значение k_{N-1} – определяется из последнего локализованного квадрата размером $p \times p$.

Восстановления изображения по части псевдоголограммы

При использовании «голографического» представлении изображения, можно осуществить несколько вариантов восстановления.

Одним из таких вариантов является восстановление исходного изображения меньшего масштаба. Размер восстановленного изображения определяется длиной подпоследовательности, взятой для этой цели (см. рис. 4).

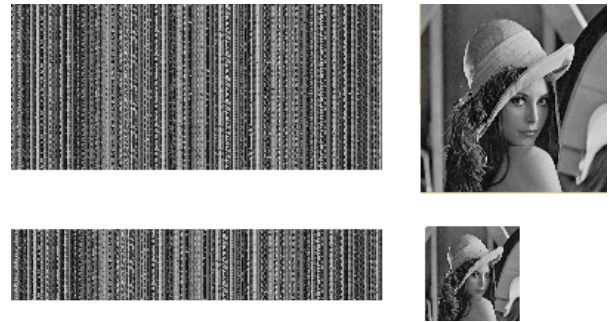


Рис. 4. Восстановление изображения при различной длине подпоследовательности

Размер полученного изображения при этом определяется следующим образом. Пусть l – длина подпоследовательности, пришедшей на вход восстанавливающей системы, тогда l можно представить в виде:

$$l = p^{2^i} + k,$$

где p – параметр преобразования, а k – число, удовлетворяющее условию: $k < p^2$. Тогда размер восстановленного изображения будет $p^i \times p^i$.

Помимо такого варианта восстановления изображения возможен и другой, при котором размер

восстановленного изображения такой же как и у исходного. Недостающие отсчеты изображения заполняются в соответствии со схемой метода интерполяции. Погрешность восстановления при заданном методе интерполяции будет зависеть от размера подпоследовательности. На рис. 5. представлены восстановленные изображения различной длины подпоследовательности.



Рис. 5. Восстановленные полноразмерные изображения

Может возникнуть ситуация, когда в распоряжении восстанавливающей системы имеется участок кодированной последовательности, но положение этого участка в голограмме неизвестно. Решение задачи восстановления изображения по произвольной части кодируемой последовательности без информации о положении данной подпоследовательности было предложено в работе [6].

Возможность восстановления изображения в данном случае основана на использовании корреляционных связей изображения.

Пусть для исходного изображения считаются известными: параметр преобразования p , размер изображения $p^N \times p^N$ и правило нумерации. Если на вход восстанавливающей системы поступила часть кодируемой последовательности $\{h_l\}$, где $k \leq l \leq k + L$ и число k – позиция подпоследовательности неизвестно, процесс восстановления возможен, но сложность его возрастает. При этом задача сводится к нахождению значения k . Это значение можно получить исходя из корреляционных связей исходного изображения. Коэффициент корреляции реальных изображений находится в диапазоне от 0,75 до 0,95.

Коэффициент корреляции, вычисленный по всему изображению для различных вариантов позиций подпоследовательности, имеет характерно выраженный максимум для случая, соответствующего искомому значению k , и локальные максимумы, соответствующие восстановленным изображениям с переставленными блоками, кратных p .

Значение положения подпоследовательности – k находится с помощью алгоритма восстановления с последовательным уточнением, описанного в [6].

Замечание. Приведенные рис. 5, 6 относятся к случаю восстановления изображения с известным порядком нумерации исходного квадрата размера $p \times p$. Примеры восстановления изображения со «случайными» порядком приведены на рис. 6.

Из вышесказанного можно заключить, что подобный метод кодирования можно использовать и в

качестве защиты информации от несанкционированного доступа.

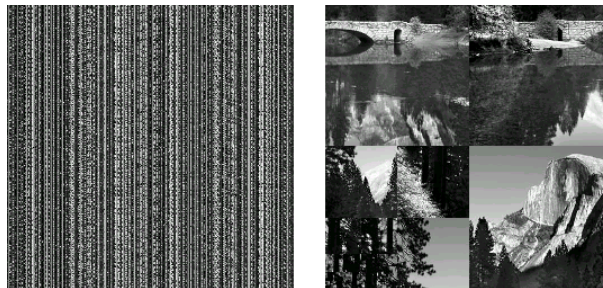


Рис. 6. Восстановление изображения при «случайном» порядке нумерации

Сравнительный анализ методов псевдоголографического кодирования

Мы сравнивали два метода: метод псевдоголографического кодирования, исследование которого является целью данной статьи, в дальнейшем именуемый «метод 1», и метод псевдоголографического кодирования, описанного в работе [5], в дальнейшем именуемый «метод 2».

Исследование проводилось на четырех тестируемых изображениях: «Lena», «Море», «Way», «Текст», каждое из которых было представлено в трех размерах: 128x128, 256x256 и 512x512, полученные путем масштабирования исходных изображений: рис. 7а – г. Каждое из этих изображений имеет определенные характеристики: изображение «Lena» – обладает набором характерных элементов, такими как области однородности и неоднородности, контуры различных направлений; «Море» – области однородности; «Way» – области неоднородности, наличие мелкодетальных объектов; «Текст» – бинарное изображение. Для каждого тестируемого изображения каждого размера был получен ряд восстановленных изображений за счет различных методов кодирования, правил нумераций и положения потерянного блока. Восстановление изображений осуществлялось путем интерполяции.



Рис. 7. Тестовые изображения

Для восстановления изображений был применен один и тот же метод интерполяции: восстановление отсчета осуществлялось по формуле (4), где A, B, C , и D – коэффициенты уравнения плоскости.

Плоскость строится по трем ближайшим известным отсчетам: (m_0, n_0, f_0) , (m_1, n_1, f_1) , (m_2, n_2, f_2) , путем решения системы уравнений (5).

$$f = -\frac{D + Am + Bn}{C} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Am_0 + Bn_0 + Cf_0 = -D, \\ Am_1 + Bn_1 + Cf_1 = -D, \\ Am_2 + Bn_2 + Cf_2 = -D, \end{cases} \quad (5)$$

здесь m_i, n_i – пространственные координаты, f_i – яркость отсчета с координатами (m_i, n_i) .

Выбор такого способа интерполяции обусловлен тем, что он может быть применен к изображениям, полученным с помощью метода 1 и метода 2.

Численное сравнение восстановленных изображений с тестируемыми производилось по среднеквадратичному и среднему арифметическому критериям. Так же для анализа результата применялся визуальный (экспертный) способ сравнения.

При визуальном анализе восстановленных изображений были выявлены разного рода искажения: размытость, импульсный шум, полученные в результате интерполяции по малому проценту известных данных. Поэтому над восстановленными изображениями, с целью повышения качества, была произведена коррекция (фильтрация шумов).

Результаты анализа сравнения метода 1 и метода 2 представлены для двух случаев: без коррекции (рис. 8) и с коррекцией (рис. 9).



Рис. 8. Восстановленные изображения без коррекции

На рис. 10 и рис. 11 приведены результаты качества восстановления исходного изображения по доли известной информации. По оси абсцисс отложе-

ны значения, соответствующие проценту известной информации восстановленного изображения.



Рис. 9. Восстановленные изображения с коррекцией

По оси ординат – результат отношения значения критерия для восстановленного изображения, соответствующего методу 1 к значению критерия для восстановленного изображения, соответствующего методу 2. На каждом рисунке изображено по четыре кривых: метод 1 случай 1 – результат восстановления изображений для метода 1 с правилом кодирования 1; метод 1 случай 2 – результат восстановления изображений для метода 1 с правилом кодирования 2; метод 1 случай 3 – результат восстановления изображений для метода 1 с правилом кодирования 1 с 100 отсчета; метод 2 – результат восстановления изображений для метода 2.

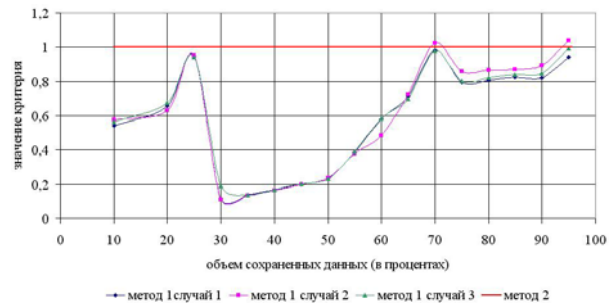


Рис. 10. Результаты сравнения восстановленных и исходных изображений без коррекции

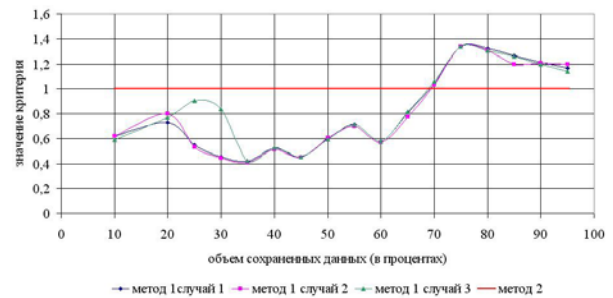


Рис. 11. Результаты сравнения восстановленных и исходных изображений с коррекцией

Анализ численных экспериментов для различных изображений дает основание для следующих выводов.

1) Размер и положение диапазона эффективности метода 1 по сравнению с методом 2 на числовой оси процентов потерянной информации зависит от вида изображения, его размера, правила нумерации и положения потерянтого блока информации. Наибольшее влияние на положение и размер диапазона оказывает специфика изображения.

2) Анализ экспериментов показал, что наибольшее значение диапазона достигается на изображении «Море», которое характеризуется наличием областей однородности, наименьшее на изображении «Текст», являющееся бинарным изображением. «Way» и «Lena», в целом, дают средние результаты. Следовательно, метод 1 является более эффективным для решения задач восстановления полутоновых изображений, состоящих предпочтительно из областей однородности при потере части информации.

3) Метод 1 является эффективнее метода 2 при «большой» потере информации (от 90 до 45 процентов от общего объема информации) не зависимо от вида, размера изображения, порядка нумерации и от того, была проведена последующая корректировка изображения или нет. В диапазоне от 20 до 55 процентов известной информации результаты восстановления изображений, соответствующие методу 1, дают гарантированно лучший результат по сравнению с методом 2. Численные результаты показывают, что преимущество метода 1 на этом диапазоне очевидно.

Исследование устойчивости электронных водяных знаков при псевдоголографическом кодировании цифровых изображений

В данной статье исследуется на устойчивость к «типичным» преобразованиям изображений метод наложения на изображение скрытого электронного «водяного знака» (watermark). Предложенный метод основан на свойствах псевдоголографического кодирования [1, 2].

Вставка водяного знака в изображение осуществляется следующим образом. Исходное изображение (рис. 12а) подвергается псевдоголографическому кодированию, в результате этого преобразования получается новое изображение – псевдоголограмма (рис. 12б). На «голограмму» накладывается «шаблон», соответствующий водяному знаку выбранного вида (рис. 13б).

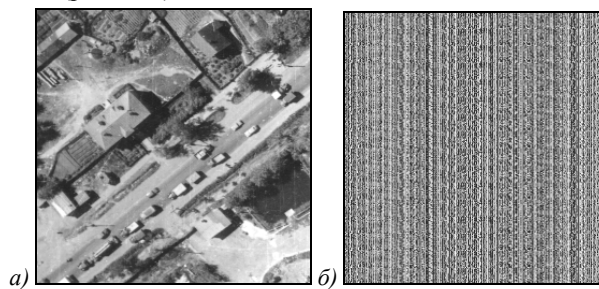


Рис. 12. Исходное изображение и его «голограмма»

При обратном преобразовании к исходному изображению, шумоподобный фон водяного знака преобразуется в изображение, близкое к исходному, а преобразованное изображение водяного знака представляет собой аддитивный шум, малозаметный при визуальном анализе (рис. 13б).

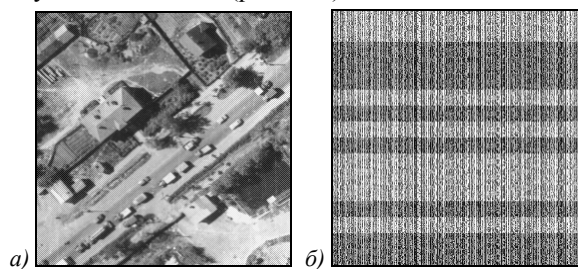


Рис. 13. Изображение и его «голограмма», содержащее «водяной» знак

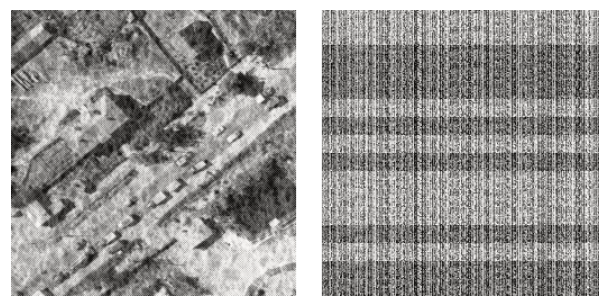
В результате эксперимента было выяснено, что водяной знак, имеющий вид «штрих-кода», является визуально менее заметным при восстановлении изображения из модифицированной псевдоголограммы, по сравнению с остальными: наложение текста, диагональных полос, значков различного вида, синусоиды. Однако количество и порядок чередования темных и светлых полос, для получения лучшего результата, должны быть не произвольны. Примеры таких водяных знаков приведены на рис. 14.



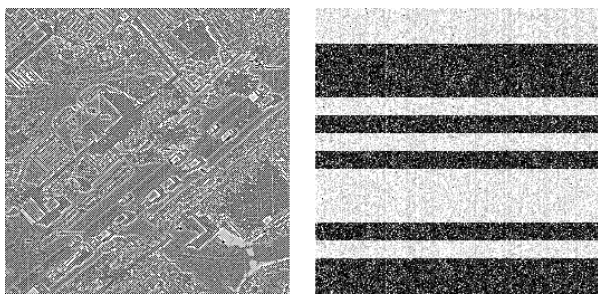
Рис. 14. Примеры водяных знаков

Исследовался на устойчивость водяной знак в виде «штрих-кода» к следующим преобразованиям:

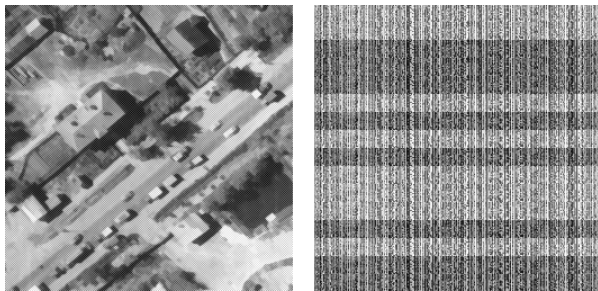
- а) изменение яркости, контраста, интенсивности,
- б) изменение четкости,
- в) наложение текстур (рис. 15а),
- г) пороговая обработка,
- д) выделения контуров (рис. 15б),
- е) сжатие с потерями,
- ж) медианная фильтрация (рис. 15в),
- з) поворот (рис. 15г),
- и) масштабирование,
- к) потеря части изображения (рис. 15д, 15е).



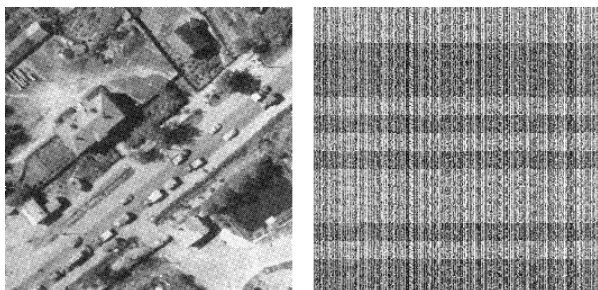
а)



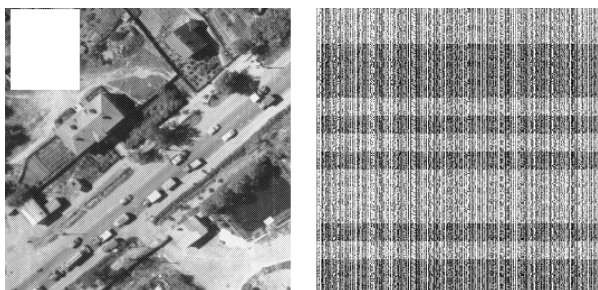
б)



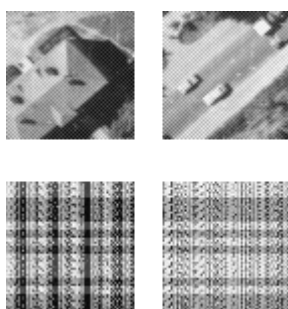
в)



з)



д)



е)

Рис. 15. Результаты преобразований

Преобразования: изменение яркости, контраста, интенсивности, изменение четкости, наложение текстур, пороговая обработка, поворот осуществлялись с помощью программы CorelDRAW версии 11, приложения Corel PHOTO-PAINT, выделение контуров

– с помощью программы CorelDRAW версии 11, приложения Corel PHOTO-PAINT, а так же Microsoft Photo Editor, медианная фильтрация, сжатие с потерями – с помощью Borland Delphi версии 6.

Результаты проведенных экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов

Номер преобразования	Название преобразования	Устойчивость геометрических характеристик
1	Изменение яркости, контраста, интенсивности	устойчив
2	Изменение четкости (усиление)	устойчив
3	Наложение текстур	устойчив
4	Пороговая обработка	устойчив
5	Выделение контуров	устойчив
6	Сжатие с потерями	устойчив
7	Медианная фильтрация	устойчив
8	Поворот с восстановлением	устойчив
9	Поворот на 90 и 270 без восстановления	устойчив
10	Поворот на 180 без восстановления	устойчив
11	Масштабирование	не устойчив
12	Потеря части изображения	устойчив
13	Восстановление знака по части изображения	устойчив

Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российско-Американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (ВНРЕ), а также Российским фондом фундаментальных исследований (гранты №№ 05-01-96501, 03-01-00736) и грантом Президента РФ № 1007.2003.01.

Литература

1. Bruckstein A.M., Holt R.J., Netravali A.N. Holographic representation of images // IEEE Transactions on Image Processing, 1998. Vol.7. P. 1583-1587.
2. Bruckstein A.M., Holt R.J., Netravali A.N. On Holographic Transform Compression of Images // John Wiley & Sons, Inc., 2001. Vol. 11. P. 292 – 314.
3. Прэйт У. Цифровая обработка изображений, т.1 // М.: Мир, 1982.
4. Прэйт У. Цифровая обработка изображений, т.2 // М.: Мир, 1982.
5. Колесов В.В., Залогин Н.Н., Воронцов Г.М. Метод псевдоголографического кодирования // Институт радиотехники и электроники РАН, 2002. С. 1–3.
6. Воронин В. В. Голографическое представление в задачах обработки изображений // ИСОИ РАН., 2000. В. С. 237–241.
7. Bruckstein A.M., Holt R.J., Netravali A.N. Self-similar Image Sampling Schemes: Holographic and Low Discrepancy Properties // Fundamental Structural Properties in Image and Pattern Analysis, Schriftenreihe der Oesterreichischen Computer Gesellschaft, 1999. В. 130. С. 59–65.
8. Методы компьютерной обработки изображений // Под ред. В.А. Сойфера // М.: Физматлит, 2001.

Algorithms of image processing presented in pseudo-holographic codes: development and research

D.A. Barinova^{1,2}

¹Samara State Aerospace University (SSAU)

²Image Processing Systems Institute of RAS

Abstract:

This paper analyses two methods of pseudo-holographic coding: "regular" and "stochastic". The results of a comparative analysis of these transformations are presented in relation to the problem of image recovery in case of loss of some information. A method is proposed which involves inserting an electronic watermark into a digital image for a regular method of pseudo-holographic coding. The results of the analysis of the watermark resistance to the "typical" transformations of digital images are presented. The applicability limits of the regular pseudo-holographic coding method for solving specific applied problems are determined.

Keywords: image processing, pseudo-holographic codes, stochastic, comparative analysis, image recovery, electronic watermark, digital image.

Acknowledgments: This work was supported by the Russian-American Program for Basic Research and Higher Education (BHRE), as well as the Russian Foundation for Basic Research (grants No. 05-01-96501, 03-01-00736) and a grant from the President of the Russian Federation No. 1007.2003 .01.

Citation: Barinova DA. Algorithms of image processing presented in pseudo-holographic codes: development and research. Computer Optics 2005; 27: 149-154.

References:

- [1] Bruckstein AM, Holt RJ, Netravali AN. Holographic representation of images. IEEE Trans Image Process 1998; 7(11): 1583-1587. DOI: 10.1109/83.725365.
- [2] Bruckstein AM, Holt RJ, Netravali AN. On holographic transform compression of images. Int J Imaging Syst Technol 2001; 11(5): 292-314. DOI: 10.1002/ima.1015.
- [3] Pratt WK. Digital image processing. New York, NY: John Wiley and Sons Inc; 1978. ISBN: 978-0-471-01888-9.
- [4] Pratt WK. Digital image processing. New York, NY: John Wiley and Sons Inc; 1978. ISBN: 978-0-471-01888-9.
- [5] Kolesov VV, Zalogin NN, Vorontsov GM. Pseudo-holographic coding method [In Russian]. Proc 4th Int Conf DSPA-2002 2002: 1-3.
- [6] Voronin VV. Holographic representation in problems of image processing [In Russian]. Proc 5th Int Conf "Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (ROAI-5-2000)" 2000; 2: 237-241.
- [7] Bruckstein AM, Holt RJ, Netravali AN. Self-similar Image Sampling Schemes: Holographic and Low Discrepancy Properties. Proc Fundamental Structural Properties in Image and Pattern Analysis Workshop 1999; B 130: 59-65.
- [8] Soifer VA, ed. Methods for computer design of diffractive optical elements. New York: John Wiley and Sons Inc; 2002. ISBN: 978-0-471-09533-0.