

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ДИНАМИКИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Евсютин О.О.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Аннотация

В работе рассматривается получение семейств ортогональных базисов из состояний развития клеточного автомата. Предлагается методика сравнения соответствующих ортогональных преобразований относительно искажений, проявляющихся в результате потерь информации на восстанавливаемых элементах данных.

Ключевые слова: клеточный автомат, ортогональное преобразование, декорреляция, сжатие.

Введение

В настоящее время известен ряд работ, в которых для решения задач цифровой обработки изображений используется математический аппарат теории клеточных автоматов. Данный аппарат применяется для улучшения изображений [1, 2], сегментации [3, 4], выделения контуров и распознавания текста [5–9], для построения схем разделения секрета, основанных на использовании цифровых изображений [10], а также в компьютерной стеганографии при встраивании в изображения цифровых водяных знаков [11, 12].

В данной статье рассматривается основанный на клеточных автоматах подход к построению ортогональных преобразований, применяемых в цифровой обработке сигналов, в частности, для сжатия цифровых изображений.

Напомним, что к самым распространённым ортогональным преобразованиям, которые используются в методах сжатия цифровых изображений, относятся преобразование Карунена–Лоэва, преобразование Уолша–Адамара, дискретное косинусное преобразование, дискретное вейвлетное преобразование (семейство преобразований) [13–16].

Помимо отмеченных, существуют и другие дискретные ортогональные преобразования. Например, в статье [17] рассматривается дискретное псевдокосинусное преобразование, являющееся более быстродействующей целочисленной аппроксимацией дискретного косинусного преобразования.

В статье [18] рассматривается метод сжатия цифровых изображений, основанный на ортогональном преобразовании, базис которого строится из состояний развития классического клеточного автомата с окрестностью Мура–фон Неймана.

В этой и других работах данного автора предлагается строить ортогональные базисы из состояний развития одномерного клеточного автомата с двоичным алфавитом внутренних состояний, интерпретируемым как множество значений $\{-1, 1\}$, для чего задаются специального вида локальные функции перехода, обеспечивающие попарную ортогональность последовательно вырабатываемых векторов. Однако использование двоичного алфавита ограничивает размерность пространства получаемых таким образом преобразований,

которые являются не более чем частным случаем известного преобразования Уолша–Адамара.

Полученные результаты использовались другими исследователями, например, в компьютерной стеганографии [12], однако проведённый обзор литературных источников показал, что какое-либо развитие описанного подхода в части увеличения мощности алфавита внутренних состояний на сегодняшний день отсутствует.

В настоящей работе предлагается применять для построения ортогональных базисов клеточные автоматы с алфавитом внутренних состояний произвольной мощности, для упрощения вычислений определяемой значением 2^m , и приводятся результаты исследования базисов, построенных для $m=2$, с перспективой дальнейшего увеличения данного значения. С целью формализации предлагаемого подхода вводится новое расширение классической модели клеточного автомата – клеточный автомат с кодовым множеством. Кроме того, отличительной особенностью предлагаемого подхода является построение не отдельных ортогональных базисов, а целых их семейств с дальнейшим выбором лучших из них в контексте рассматриваемой задачи.

1. Математическая модель клеточного автомата

Математическая модель клеточного автомата описывается следующей совокупностью компонентов: $CA = \langle Z^n, L, A, Y, \sigma \rangle$. Её подробное описание можно найти в [19, 20]. Отметим только, что данная модель соответствует клеточному автомату с конечной решёткой, что представляет более естественным в прикладных задачах.

Как расширение классической модели клеточного автомата введём понятие клеточного автомата с кодовым множеством $CA_K = \langle CA, K, \phi \rangle$, где CA есть некоторый клеточный автомат с алфавитом внутренних состояний A , K — упорядоченное множество значений, такое, что $|K| = |A|$, и отображение $\phi: A \rightarrow K$ ставит в соответствие символам алфавита внутренних состояний A элементы кодового множества K .

В настоящей работе в качестве базы клеточного автомата с кодовым множеством используется блочный клеточный автомат (клеточный автомат на разбиении), представляющий собой одно из известных

расширений классической модели клеточного автомата [21]. Основное отличие данного клеточного автомата от классической модели заключается в том, что в каждый момент времени обновляются состояния не отдельно взятых клеток, а составленных из клеток блоков, на которые разбивается решётка клеточного автомата, причём схема разбиения решётки на блоки меняется от шага к шагу. Блочный клеточный автомат описывается совокупностью компонентов $CA_p = \langle Z^n, \mathbf{L}, \mathbf{B}, A, \mathbf{P}, \psi \rangle$, где Z^n , \mathbf{L} и A соответствуют аналогичным составляющим классической модели; $\mathbf{B} = (b_1, \dots, b_n)$, $b_i > 0$ и $b_i | l_i$, $i = \overline{1, n}$ — вектор, задающий размеры блока разбиения; $\mathbf{P} = (p_1, \dots, p_m)$, $p_j \in \{0, \dots, b_1 - 1\} \times \dots \times \{0, \dots, b_n - 1\}$, $j = \overline{1, m}$ — вектор, задающий набор схем разбиения решётки клеточного автомата на блоки и определяющий последовательность их применения; ψ — блочная функция перехода, обновляющая состояние каждого блока решётки клеточного автомата в каждый момент времени.

Одной из важных особенностей блочных клеточных автоматов является их обратимость в случае задания блочной функции перехода в виде подстановки

$$S \left(A \prod_{i=1}^n b_i \right).$$

2. Построение семейств ортогональных базисов с помощью динамики клеточного автомата

Построение ортогонального базиса из состояний развития клеточного автомата осуществляется следующим образом: выбирается одномерный клеточный автомат CA , для которого $\mathbf{L} = (N)$, над ним задаётся клеточный автомат с кодовым множеством $CA_K = \langle CA, K, \phi \rangle$, и для некоторого начального состояния решётки рассматривается история развития клеточного автомата — последовательность состояний решётки в моменты времени $t = 1, 2, \dots$. В результате применения отображения $\phi: A \rightarrow K$ к начальному состоянию решётки определяется первый базисный вектор, после чего из истории развития клеточного автомата выбираются ещё $N - 1$ векторов, так, чтобы имела место их попарная ортогональность.

Алгоритм построения ортогонального базиса с помощью динамики блочного клеточного автомата сформулирован в статье [20]. Выбор блочного клеточного автомата обусловлен тем, что благодаря присущей ему обратимости, возникающей, когда блочная функция перехода является биекцией, его истории развития не содержат циклов неопределённой длины.

Множество ортогональных базисов, полученных из состояний развития клеточного автомата с кодовым множеством $CA_K = \langle CA, K, \phi \rangle$ для всех возможных начальных состояний решётки, назовём семейством

базисов и обозначим $\Sigma(CA_K)$. Также будем говорить о семействе ортогональных преобразований, основанных на базисах из $\Sigma(CA_K)$.

Экспериментальным путём было установлено, что отдельные семейства (для $N = 8$) в общем случае могут содержать до нескольких сотен тысяч различных базисов. Данный факт определил необходимость разбиения семейств базисов на подсемейства, состоящие из ортогональных базисов, преобразования на основе которых близки по своим свойствам, и создания соответствующего алгоритма, позволяющего относить заданный базис к тому или иному подсемейству. Такой алгоритм сформулирован в статье [22]. Он направлен на выявление способности ортогонального преобразования разделять элементы данных на частотные составляющие. Для этого задаётся вектор значений, обладающих пространственной избыточностью, и осуществляется его преобразование по формуле

$$\mathbf{G} = \mathbf{F}(\mathbf{D} \cdot \mathbf{C}), \tag{1}$$

где $\mathbf{F} = (f_i)_{i=1}^N$ — заданный вектор (вектор-строка); $\mathbf{C} = (c_{ij})_{i=1, j=1}^{N, N}$, $c_{ij} \in K$, $i, j = \overline{1, N}$ — базис дискретного ортогонального преобразования; $\mathbf{D} = (d_{ij})_{i=1, j=1}^{N, N}$,

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } i = j, \\ \sqrt{\sum_{j=1}^N c_{ij}^2}, & i, j = \overline{1, N} \\ 0, & \text{при } i \neq j, \end{cases}$$

нормировочная матрица.

После преобразования вектора \mathbf{F} определяется, какие из преобразованных элементов данных могут быть отнесены к низкочастотным составляющим, содержащим основную (усреднённую) информацию об исходном векторе \mathbf{F} , а какие — к высокочастотным, указывающим на различия между отдельными элементами вектора \mathbf{F} . Для этого вводится параметр λ , определяющий минимальное отношение значения элемента g_i , $i = \overline{1, N}$, вектора \mathbf{G} к значению

$$M = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f_j,$$

низкочастотной составляющей.

Отметим, что термин «частотные составляющие» вводится по аналогии с классическими ортогональными преобразованиями, использующимися в цифровой обработке изображений.

Кроме того, в рассматриваемом алгоритме вычисляется величина разброса значений низкочастотных составляющих по формуле

$$v = \frac{\min(\hat{g}_i)}{\max(\hat{g}_i)}, \tag{2}$$

где \hat{g}_i , $i = \overline{1, r}$, $0 \leq r \leq N$ — элементы вектора \mathbf{G} , отнесённые к низкочастотным составляющим.

Таким образом, подсемейством семейства ортогональных базисов $\Sigma(CA_K)$ назовём множество таких базисов, принадлежащих $\Sigma(CA_K)$, что построенные на их основе ортогональные преобразования имеют в своём частотном спектре r низкочастотных составляющих, удовлетворяющих заданным значениям определяющего коэффициента λ и параметра разброса ν , и введём обозначение $\Sigma_{r, \lambda, \nu}(CA_K)$, $\Sigma_{r, \lambda, \nu}(CA_K) \subseteq \Sigma(CA_K)$.

Изменяя параметры r, λ, ν , можно получать ортогональные преобразования различного вида, в том числе аппроксимации известных преобразований. В частности, отметим, что упомянутое ранее дискретное псевдосинусное преобразование может быть описано в терминах клеточных автоматов как представитель подсемейства базисов $\Sigma_{1, \lambda}(CA_{\{-2, -1, 1, 2\}})$ для некоторого клеточного автомата CA , где $\lambda \leq 0,4$ (параметр разброса ν не имеет смысла при $r = 1$).

В настоящей работе строятся и исследуются ортогональные преобразования, подобные дискретному вейвлетному преобразованию, когда $N \equiv 0 \pmod{2}$ и $r = \frac{N}{2}$.

Для построения семейств ортогональных базисов использована динамика клеточного автомата $CA_K = \langle CA_p, K, \phi \rangle$ с кодовым множеством вида $K_s = \{-2^s, -2^s + 1, 2^s - 1, 2^s\}$, s — натуральное, заданного над блочным клеточным автоматом $CA_p = \langle Z, (8), (2), A, P, \psi \rangle$, где алфавит внутренних состояний $A = \{0, 1, 2, 3\}$, набор схем разбиения $P = \begin{bmatrix} (0) & (1) \end{bmatrix}$ и блочная функция перехода $\psi = \begin{pmatrix} 0 & 8 & 4 \\ 3 & 5 & 15 & 12 & 11 & 14 & 6 & 7 & 9 & 13 \end{pmatrix}$. ϕ естественным образом определено как $0 \mapsto -2^s, 1 \mapsto -2^s + 1, 2 \mapsto 2^s - 1, 3 \mapsto 2^s$.

В табл. 1 представлены количественные характеристики построенных семейств и подсемейств ортогональных базисов для $s = 1, 9$.

Таблица 1. Количество построенных ортогональных базисов

Значение s	Мощность семейства $\Sigma(CA_{K_s})$	Мощность подсемейства $\Sigma_{4, 0,45, 0,85}(CA_{K_s})$
1	75052	4
2	226036	142
3	226863	196
4	226863	213
5	226863	223
6	226863	234
7	226863	201
8	226863	188
9	226863	184

Можно увидеть, что количество базисов в сформированных подсемействах намного меньше мощности соответствующих семейств, однако по-прежнему

остаётся достаточно велико, и это определяет необходимость выбора лучших из них в контексте решаемой задачи. Применительно к задаче сжатия цифровых изображений с потерями, о которой шла речь ранее, лучшими будут такие ортогональные базисы, преобразования на основе которых приведут к меньшим искажениям восстановленных элементов данных при равном уровне потерь информации, произведённых в процессе сжатия.

3. Методика выбора лучших преобразований по ошибке восстановления

Пусть $P = (p_{ij})_{i=1, j=1}^{w, h}$, $p_{ij} \in \{0, 1, \dots, 255\}$, $i = \overline{1, w}$, $j = \overline{1, h}$ — матрица пикселей цифрового изображения (для упрощения возьмём полутоновое изображение), тогда задачу сжатия с потерями информации определим как нахождение такого отображения $\Omega: P \mapsto l$, где $l \in \{0, 1\}^k$, что при заданном значении ошибки восстановления $k \rightarrow \min$.

Решение данной задачи, основанное на использовании дискретных ортогональных преобразований, заключается в устранении из изображения пространственной избыточности, проявляющейся в виде близости друг другу значений соседних пикселей на локальных участках изображения. Это достигается за счёт разделения элементов данных на составляющие, содержащие основную информацию об изображении и определяющие малозначимые детали. Удаление составляющих второго типа из преобразованных элементов данных с последующим энтропийным кодированием оставшихся элементов обеспечивает сжатие изображения.

В связи с вышесказанным эффективность ортогональных преобразований будем оценивать по количеству нулевых значений, полученных в результате преобразования с последующим квантованием. Произведённые при этом потери информации приводят к восстановлению изображений с искажениями, для оценки которых используются различные методы [23]. В настоящей работе используем базовую величину, определяющую ошибку восстановления элементов данных цифрового изображения – корень из среднеквадратической ошибки, – вычисляемую по формуле

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - g_i)^2} \tag{3}$$

Использованные здесь обозначения соответствуют введённым ранее.

Другим классическим критерием качества восстановления изображений является пиковое отношение сигнал/шум, вычисляемое по формуле

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\max(f_i)}{RMSE} \tag{4}$$

Данные величины, обратно пропорциональные друг другу, представляют собой два равноценных критерия, пригодных для базовой оценки качества восстановления изображений. В рамках данной работы выбран корень из среднеквадратической ошибки,

расчёт которого требует немного меньше вычислений, что более удобно при обработке многотысячных подсемейств ортогональных базисов.

Методику выбора лучших ортогональных преобразований по ошибке восстановления определим следующей последовательностью этапов.

1. Формирование множества (подсемейства или набора подсемейств) Σ ортогональных базисов порядка N с помощью динамики клеточного автомата с кодовым множеством.

2. Формирование набора целочисленных матриц (простых тестовых изображений), моделирующих некоторые основные особенности поведения, присущие реальным цифровым изображениям на локальных участках: плавный цветовой переход, наличие нескольких различающихся областей с плавным цветовым переходом, наличие объекта на фоне плавного цветового перехода, наличие линий на фоне плавного цветового перехода.

В настоящей работе для $N = 8$ предлагается использовать набор из 33 полутоновых цифровых изображений размером 8×8 пикселей, выполненных в различных сочетаниях тёмных, средних и светлых полутонов (рис. 1).

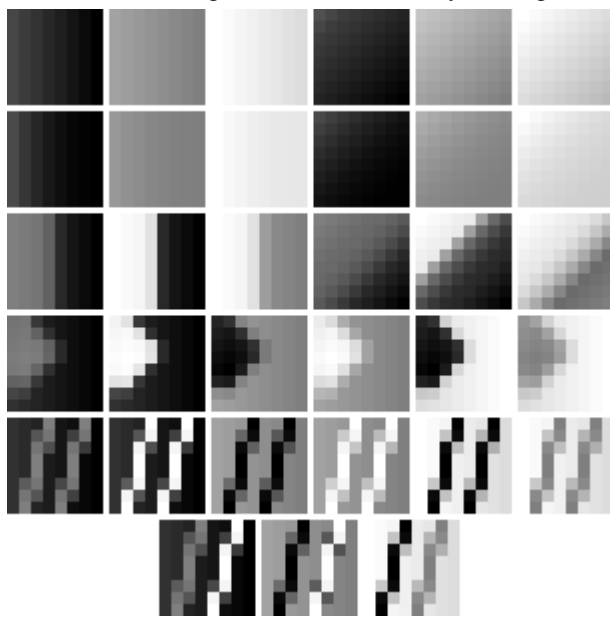


Рис. 1. Набор простых тестовых изображений

3. Применение ортогонального преобразования на основе каждого из построенных базисов $C \in \Sigma$ к каждому из заданных тестовых изображений с последующим квантованием преобразованных элементов данных по простой схеме с двумя коэффициентами $SQ = (q_H, q_B)$, где q_H – квантователь низкочастотных составляющих, q_B – высокочастотных.

4. Обращение каждого преобразования с вычислением значения RMSE и количества нулей среди преобразованных элементов данных по каждому из изображений и расчёт следующих статистических характеристик: среднего количества нулей среди квантованных элементов данных, коэффициента вариации данного значения, среднего значения RMSE и коэффициента вариации данного значения, – которые для

некоторого базиса $C \in \Sigma$ обозначим соответственно $z(C)$, $V_z(C)$, $RMSE(C)$, $V_{RMSE}(C)$.

5. Разбиение множества Σ на l непересекающихся подмножеств $\Sigma = \bigcup_i \Sigma_i$, где Σ_i , $i = \overline{1, l}$, определяется

следующим образом: отрезок числовой прямой $\left[0, \frac{3}{4}N^2\right]$, составляющий множество возможных значений характеристики z , разбивается на l частей, и если $z(C)$, $C \in \Sigma$, попадает в i -й отрезок, то $C \in \Sigma_i$.

6. Выбор лучших ортогональных базисов в каждом подмножестве Σ_i , $i = \overline{1, l}$, для которых среднее значение RMSE является минимальным, и объединение их в множество $\hat{\Sigma} \subset \Sigma$. При рассмотрении базисов $C_1, C_2 \in \Sigma$ таких, что $RMSE(C_1) \approx RMSE(C_2)$, лучшим считается базис с меньшим разбросом значений RMSE.

7. Применение ортогональных преобразований, основанных на базисах из $\hat{\Sigma}$, к каждому из заданных простых тестовых изображений так, чтобы уровень потерь информации стал одинаков, что выражается приближённо равным количеством нулей среди преобразованных элементов данных и достигается с помощью варьирования значений коэффициентов квантования.

8. Итоговый выбор лучших по ошибке восстановления ортогональных базисов.

Рассмотрим применение данной методики к подсемейству базисов малой мощности $\Sigma_{4, 0,45, 0,85}(CA_{K_1})$. Значения всех введённых статистических характеристик базисов, составляющих данное подсемейство и полученных при использовании схемы квантования $SQ = (10, 20)$, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики базисов подсемейства $\Sigma_{4, 0,45, 0,85}(CA_{K_1})$

Начальное состояние решётки	z	V_z	RMSE	V_{RMSE}
2302300312	7,79	70,0	5,046	8,02
3203231002	9,06	60,5	5,040	9,61
2033023303	13,24	72,9	4,780	11,23
0233323033	16,09	58,2	4,617	12,92

Матрицы, определяющие базисы, не приводятся для сокращения описания — вместо этого для каждого базиса указывается начальное состояние решётки клеточного автомата как слово в алфавите A , задающее первый базисный вектор, что при известной функции перехода однозначно определяет весь набор базисных векторов. Длина данных слов превышает N и определяется по формуле $N + 2(b - 1)$, где b – длина блока разбиения, так как обработка граничных клеток в процессе развития клеточного автомата осуществляется не с помощью обёртываемости, а посредством дополнения решётки клеточного автомата.

Нетрудно заметить, что представленные в табл. 2 базисы обладают следующим свойством:

$\forall C_1, C_2 \in \Sigma_{4,0,45,0,85}(CA_{K_1})$ из того, что $z(C_1) > z(C_2)$ следует, что $RMSE(C_1) < RMSE(C_2)$. Вследствие этого применять шаги 7, 8 предлагаемой методики нет необходимости – в $\Sigma_{4,0,45,0,85}(CA_{K_1})$ лучшим однозначно является базис C , для которого $z(C) = 16,09$ и $RMSE(C) = 4,617$.

Применение методики к другим подсемействам ортогональных базисов, построенным в настоящей работе, детально рассматривать не будем ввиду объёмности соответствующих таблиц и ограничимся представлением итоговых результатов. Здесь необходимо отметить, что значение l при $N = 8$ представляется естественным принять равным 49, так как в этом случае $0 \leq z(C) \leq 48$.

В результате в каждом из подсемейств $\Sigma_{4,0,45,0,85}(CA_{K_s})$, $s = \overline{1,9}$, выбраны ортогональные базисы с лучшими характеристиками. В табл. 3 для примера описывается по одному представителю из каждого подсемейства. Приведённые характеристики базисов получены при использовании схемы квантования $SQ = (10,20)$.

Таблица 3. Примеры базисов с лучшими характеристиками

s	Начальное состояние решётки	z	V_z	RMSE	V_{RMSE}
1	0233323033	16,09	58,2	4,617	12,92
2	2113331322	21,97	46,4	4,337	16,71
3	2000113232	27,97	40,8	4,068	23,65
4	0112232332	27,61	35,4	4,263	21,50
5	2312331012	26,64	33,1	4,074	24,69
6	3333301112	26,70	33,0	3,904	28,13
7	0322032211	26,70	31,8	3,902	28,64
8	3013230311	26,58	32,5	3,932	27,10
9	1313323232	26,55	32,7	3,934	27,46

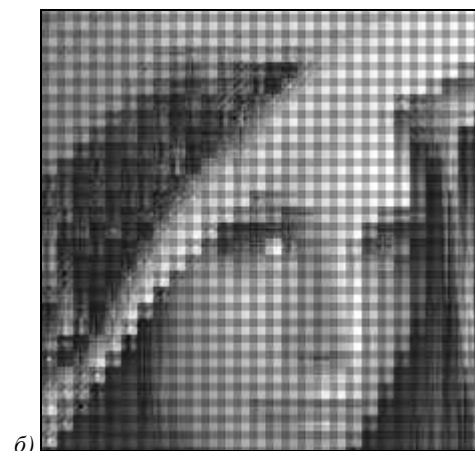
Можно увидеть, что при изменении значения s от 1 до 7 наблюдается улучшение характеристик получаемых базисов: ошибка восстановления уменьшается одновременно с ростом (или сравнимостью) количества нулей среди преобразованных элементов данных, что позволит с большим эффектом использовать ортогональные преобразования, основанные на данных базисах, для сжатия цифровых изображений. Здесь отметим, что подобное поведение имеет место не только для приведённых базисов, но и для соответствующих подсемейств в целом.

Вычислительные эксперименты с построенными базисами проводились с использованием классических корпусов тестовых изображений (полутонных и полноцветных), содержащих изображения Baboon, Barbara, Boat, Goldhill, Lenna, Peppers и т.д. разрешением 512×512 пикселей.

Проведённые эксперименты показали, что использование значения RMSE в качестве критерия качества восстановления изображений позволяет правильно выявлять с помощью предложенной методики луч-

шие преобразования в исследуемых подсемействах. Здесь необходимо привести некоторые пояснения.

Было установлено, что артефакты, проявляющиеся на восстанавливаемых изображениях для различных ортогональных преобразований, пусть даже из одного подсемейства, разнятся по своей структуре. Например, некоторые типичные артефакты показаны на 2, где представлен фрагмент классического тестового изображения Lenna, восстановленного после различных ортогональных преобразований из подсемейства $\Sigma_{4,0,45,0,85}(CA_{K_s})$ при полном удалении из матрицы преобразованных элементов данных всех высокочастотных составляющих первого уровня.





2) *Рис. 2. Примеры артефактов для различных преобразований*

Можно увидеть, что в некоторых случаях на изображении появляется «сетка» (рис. 2а), в некоторых – артефакты скорее образуют «решётку» (рис. 2б), а также возникают разнообразные эффекты «блочности» (рис. 2в, г). Использование упоминаемой ранее схемы квантования $SQ=(10,20)$ даёт аналогичную картину, но с менее выраженными артефактами.

Корень из среднеквадратической ошибки не позволяет измерить разницу между этими артефактами – проведённые эксперименты показали отсутствие явной зависимости между структурными особенностями артефактов, проявляющихся на восстанавливаемых изображениях, и соответствующими диапазонами значений RMSE.

Однако если добавить к данным изображениям изображение, представленное на рис. 3, то можно увидеть, что оно не содержит значительных артефактов.



Рис. 3. Фрагмент изображения, восстановленного без появления значительных артефактов

При этом для ортогонального преобразования, с помощью которого было получено изображение, представленное на рис. 3, значение RMSE, рассчитанное на этапе 7 рассмотренной ранее методики, оказалось существенно меньше, чем для ортогональных преобразований, с помощью которых были получены изображения, представленные на рис. 2. Эти расчёты производились после достижения приближённо равного количества нулей среди преобразованных элементов дан-

ных для всех рассматриваемых преобразований. Поэтому можно отметить, что, хотя критерий RMSE и не позволяет сравнивать между собой артефакты различного вида, он позволяет разделять исследуемые преобразования на два класса: те, для которых при заданном уровне потерь информации на восстанавливаемых изображениях проявляются заметные артефакты, и те, для которых при том же уровне потерь значительных искажений не наблюдается. Таким образом, выбранный критерий позволяет достичь решения поставленной задачи по выбору лучших преобразований в построенных подсемействах.

Заключение

В данной работе рассмотрен подход к построению семейств базисов ортогональных преобразований с помощью динамики клеточного автомата и предложена методика выбора лучших по ошибке восстановления преобразований при использовании в качестве критерия качества величины RMSE. Проведённые эксперименты показывают, что для построения ортогональных преобразований может использоваться не только классический двоичный клеточный автомат, как это было в предшествующих работах, но и клеточный автомат с алфавитом внутренних состояний большей мощности. Получаемые таким образом ортогональные преобразования могут применяться в алгоритмах сжатия цифровых изображений, например, для целочисленной (или в рациональных числах) аппроксимации известных преобразований: дискретного косинусного преобразования и дискретного вейвлетного преобразования.

Продолжением данной работы будет построение ортогональных преобразований с помощью кодовых множеств вида, отличного от рассмотренного в статье, и их исследование. Кроме того, предлагаемая методика может быть дополнена более сложными критериями оценки расхождения между исходным и восстановленным после преобразования с потерями информации изображениями, нежели корень из среднеквадратической ошибки или пиковое отношение сигнал/шум.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-31378).

Литература

1. **Rosin, P.L.** Training cellular automata for image processing / P.L. Rosin // 14th Scandinavian Conference, SCIA 2005, Joensuu, Finland. – 2005. – P. 195-204.
2. **Panagiotopoulos, F.K.** Quantum-dot cellular automata design for median filtering and mathematical morphology operations on binary images / F.K. Panagiotopoulos, V.A. Mardiris, V. Chatzis // 10th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2012, Santorini Island, Greece. – 2012. – P. 554-564.
3. **Kauffmann, C.** Seeded ND medical image segmentation by cellular automaton on GPU / C. Kauffmann, N. Piché // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. – 2010. – V. 5, Issue 3. – P. 251-262.
4. **Liu, Y.** An effective approach of lesion segmentation within the breast ultrasound image based on the cellular

- automata principle / Y. Liu, H.D. Cheng, J. Huang, Y. Zhang, X. Tang // Journal of Digital Imaging. – 2012. – V. 25, Issue 5. – P. 580-590.
5. **Chen, Y.** A cellular automatic method for the edge detection of images / Y. Chen, Z. Yan // 4th International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2008 Shanghai, China. – 2008. – P. 935-942.
 6. **Sahoo, G.** Text extraction and enhancement of binary images using cellular automata / G. Sahoo, Tapas Kumar, B.L. Raina, C.M. Bhatia // International Journal of Automation and Computing. – 2009. – V. 6, Issue 3. – P. 254-260.
 7. **Belan, S.N.** Specialized cellular structures for image contour analysis // Cybernetics and Systems Analysis. – 2011. – V. 47, Issue 5. – P. 695-704.
 8. **Zagoris, K.** Scene text detection on images using cellular automata / K. Zagoris and I. Pratikakis // 10th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2012, Santorini Island, Greece. – 2012. – P. 514-523.
 9. **Peña-Cantillana, F.** Parallel skeletonizing of digital images by using cellular automata / F. Peña-Cantillana, A. Berciano, D. Díaz-Pernil, M.A. Gutiérrez-Naranjo // 4th International Workshop, CTIC 2012, Bertinoro, Italy. – 2012. – P. 39-48.
 10. **del Rey, A.M.** A secret sharing scheme for digital images based on two-dimensional linear cellular automata / A.M. del Rey // 12th International Workshop, IWCIA 2008, Buffalo, NY, USA. – 2008. – P. 318-329.
 11. **Mankar, V.H.** Cellular automata based robust watermarking architecture towards the VLSI realization / V.H. Mankar, T.S. Das, S.K. Sarkar // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2007. – Issue 7. – P. 20-29.
 12. **Wu, H.** A new JPEG image watermarking algorithm based on cellular automata / H. Wu, J. Zhou, X. Gong, Y. Wen, B. Li // Journal of Information & Computational Science. – 2011. – V. 8, Issue 12. – P. 2431-2439.
 13. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
 14. **Сэломон, Д.** Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
 15. **Белов, А.М.** Исследование эффективности алгоритмов компрессии изображений на основе обобщенных вейвлет-преобразований Хаара // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 74-77.
 16. **Копенков, В.Н.** Эффективные алгоритмы локального дискретного вейвлет-преобразования с базисом Хаара // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 78-84.
 17. **Умняшкин, С.В.** Алгоритм сжатия изображений на основе дискретного псевдокосинусного преобразования / С.В. Умняшкин, В.В. Курина // Цифровая обработка сигналов. – 2009. – № 3. – С. 2-7.
 18. **Lafe, O.** Data Compression and Encryption Using Cellular Automata Transforms // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 1997. – V. 10, Issue 6. – P. 581-591.
 19. **Кудрявцев, В.Б.** Основы теории однородных структур / В.Б. Кудрявцев, А.С. Подколзин, А.А. Болотов. – М.: Наука, 1990. – 296 с.
 20. **Евсютин, О.О.** Разработка и тестирование вычислительного метода построения базисов декоррелирующих преобразований с использованием клеточных автоматов на разбиении / О.О. Евсютин, С.К. Росошек // Труды СПИИРАН. – 2012. – Вып. 4(23). – С. 324-342.
 21. **Тоффоли, Т.** Машины клеточных автоматов / Т. Тоффоли, Н. Марголюс. – М.: Мир, 1991. – 280 с.
 22. **Евсютин, О.О.** Приложения клеточных автоматов в области информационной безопасности и обработки данных / О.О. Евсютин, А.А. Шелупанов // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1(25), ч. 2. – С. 119-125.
 23. **Лапшенков, Е.М.** Нестандартная оценка уровня шума цифрового изображения на основе гармонического анализа // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, №3. – С. 439-447.

References

1. **Rosin, P.L.** Training cellular automata for image processing / P.L. Rosin // 14th Scandinavian Conference, SCIA 2005, Joensuu, Finland. – 2005. – P. 195-204.
2. **Panagiotopoulos, F.K.** Quantum-dot cellular automata design for median filtering and mathematical morphology operations on binary images / F.K. Panagiotopoulos, V.A. Mardiris, V. Chatzis // 10th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2012, Santorini Island, Greece. – 2012. – P. 554-564.
3. **Kauffmann, C.** Seeded ND medical image segmentation by cellular automaton on GPU / C. Kauffmann, N. Piché // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. – 2010. – V. 5, Issue 3. – P. 251-262.
4. **Liu, Y.** An effective approach of lesion segmentation within the breast ultrasound image based on the cellular automata principle / Y. Liu, H.D. Cheng, J. Huang, Y. Zhang, X. Tang // Journal of Digital Imaging. – 2012. – V. 25, Issue 5. – P. 580-590.
5. **Chen, Y.** A cellular automatic method for the edge detection of images / Y. Chen, Z. Yan // 4th International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2008 Shanghai, China. – 2008. – P. 935-942.
6. **Sahoo, G.** Text extraction and enhancement of binary images using cellular automata / G. Sahoo, Tapas Kumar, B.L. Raina, C.M. Bhatia // International Journal of Automation and Computing. – 2009. – V. 6, Issue 3. – P. 254-260.
7. **Belan, S.N.** Specialized cellular structures for image contour analysis // Cybernetics and Systems Analysis. – 2011. – V. 47, Issue 5. – P. 695-704.
8. **Zagoris, K.** Scene text detection on images using cellular automata / K. Zagoris and I. Pratikakis // 10th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2012, Santorini Island, Greece. – 2012. – P. 514-523.
9. **Peña-Cantillana, F.** Parallel skeletonizing of digital images by using cellular automata / F. Peña-Cantillana, A. Berciano, D. Díaz-Pernil, M.A. Gutiérrez-Naranjo // 4th International Workshop, CTIC 2012, Bertinoro, Italy. – 2012. – P. 39-48.
10. **del Rey, A.M.** A secret sharing scheme for digital images based on two-dimensional linear cellular automata / A.M. del Rey // 12th International Workshop, IWCIA 2008, Buffalo, NY, USA. – 2008. – P. 318-329.
11. **Mankar, V.H.** Cellular automata based robust watermarking architecture towards the VLSI realization / V.H. Mankar, T.S. Das, S.K. Sarkar // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2007. – Issue 7. – P. 20-29.
12. **Wu, H.** A new JPEG image watermarking algorithm based on cellular automata / H. Wu, J. Zhou, X. Gong, Y. Wen, B. Li // Journal of Information & Computational Science. – 2011. – V. 8, Issue 12. – P. 2431-2439.
13. **Gonzalez, R.** Digital image processing / R. Gonzalez, R. Woods. – Moscow: "Technosphaera" Publisher, 2005. – 1072 p. – (In Russian).

14. **Salomon, D.** Compression of data, images, sound / D. Salomon. – Moscow: “Technosphaera” Publisher, 2004. – 368 p. – (In Russian).
15. **Belov, A.M.** Research of the efficiency of algorithms of image compression based on the generalized Haar wavelet transforms // Computer Optics. – 2008. – V. 32, Issue 1. – P. 74-77. – (In Russian).
16. **Kopenkov, V.N.** Efficient algorithms for local discrete wavelet transform with Haar basis // Computer Optics. – 2008. – V. 32, Issue 1. – P. 78-84. – (In Russian).
17. **Umnyashkin, S.V.** Image compression algorithm based on the discrete pseudo-cosine transform / S.V. Umnyashkin, V.V. Kurina // Digital Signal Processing. – 2009. – Issue 3. – P. 2-7. – (In Russian).
18. **Lafe, O.** Data Compression and Encryption Using Cellular Automata Transforms // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 1997. – V. 10, Issue 6. – P. 581-591.
19. **Kudrjavitzev, V.B.** The foundations of the theory of homogeneous structure / V.B. Kudrjavitzev, A.S. Podkolzin, A.A. Bolotov. – Moscow: “Nauka” Publisher, 1990. – 296 p. – (In Russian).
20. **Evsutin, O.O.** Designing and testing of the computational approach of decorrelating transformation bases construction with the use of partitioning cellular automata / O.O. Evsutin, S.K. Rososhek // Trudy SPIIRAN. – 2012. – V. 4(23). – P. 324-342. – (In Russian).
21. **Toffoli, T.** Cellular automata machines / T. Toffoli, N. Margolus. – Moscow: “Mir” Publisher, 1991. – 280 p. – (In Russian).
22. **Evsutin, O.O.** Applications of cellular automata in the field of information security and data processing / O.O. Evsutin, A.A. Shelupanov // Doklady TUSUR. – 2012. – V. 1(25), part 2. – P. 119-125. – (In Russian).
23. **Lapshenkov, E.M.** No reference estimation of noise level of digital image is based on harmonic analysis / E.M. Lapshenkov // Computer Optics. —2012. —Vol. 36, № 3. — P. 439-447. — (In Russian).

RESEARCH OF THE DISCRETE ORTHOGONAL TRANSFORMATION RECEIVED WITH USE THE DYNAMICS OF CELLULAR AUTOMATA

O.O. Evsutin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

Abstract

This paper is aimed at receiving orthogonal bases families from the evolving states of cellular automata. I suggest a comparison technique of the appropriate orthogonal transformations in respect of noises, shown as a result of information losses on the restored data elements.

Key words: cellular automata, orthogonal transformation, decorrelating, compression.

Сведения об авторе



Евсютин Олег Олегович, 1987 года рождения. В 2009 году с отличием окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем». Кандидат технических наук (2012 год), работает доцентом кафедры комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем ТУСУР. В списке научных работ О.О. Евсютина 10 научных статей, 1 монография в соавторстве. Область научных интересов: информационная безопасность, криптография, обработка цифровых изображений, приложения теории клеточных автоматов.

E-mail: eoo@keva.tusur.ru.

Oleg Olegovich Evsutin (b. 1987) graduated with honours (2009) from the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TSUCSR), majoring in Complex Information Security of Computer Systems. He received his Candidate in Engineering (2012) degree from the Tomsk State University. He is the associate professor at the TSUCSR's Complex Information Security of Computer Systems sub-department. He is a co-author of 10 scientific papers, 1 monograph. His current research interests include information security, cryptography, digital images processing, applications of cellular automata theory.

Поступила в редакцию 24 декабря 2013 г.